

SZEMLE

A műtrágyák P-utóhatására ható tényezők és a P talajbeli átalakulásának modellezése

Az elmúlt évtizedek folyamán világszerte igen jelentős műtrágyamennyiségeket használtak fel a mezőgazdaságban. Míg RUSSELL (1977) szerint több mint 100 millió tonnára volt tehető évenként a Föld talajaiba adott esszenciális növényi tápanyagok mennyisége, addig SAROA & BISWAS (1989) szerint 1989-re már ez az évi felhasználás körülbelül megkétszereződött.

A foszfor azon növényi tápanyagok egyike, mely a trágyázás időpontja után még jó ideig alkalmazásának helyén, kisebb-nagyobb mértékben felvehető állapotban megmarad. Mivel a növények kevesebb foszfort vonnak ki a talajból, mint amennyit trágyával adni szoktak, a foszfor felhalmozódik a talajokban, amit azután a későbbi évek során a növények fel tudnak használni. Ha igen sok foszfor halmozódott fel a talajban, a növények egy újabb P-trágyázásra nem, vagy csak alig reagálnak. A talajban visszamaradt P felvehetősége viszont az idő előrehaladásával csökken. Ez a két szempont határozza be a P-trágyák utóhatás-vizsgálatának területét. A kérdés vizsgálata azért is időszerű, mert egyrészt a Föld népessége nagymértékben nő, másrészt a műtrágyák előállításához szükséges energia ára folytonosan emelkedik, így igen lényeges egy olyan optimális műtrágyázási stratégia kialakítása, mely a feltétlenül szükséges élelmiszer-mennyiség megtermelését biztosítani képes.

Magyarországon is, egészen a 80-as évek elejéig igen nagy mértékben nőtt a műtrágya-felhasználás, s a magyar talajok P-mérlege erre az időre erősen pozitívvá vált. A szerves- és műtrágyákkal megközelítően kétszer annyi foszfor jutott a talajba, mint amennyit a betakarított termések tartalmaztak, tehát a magyarországi talajok P-tartalma is jelentősen megnövekedett. Az újabb talajvizsgálati eredmények azt mutatják, hogy a talajok könnyen oldható P-tartalmuk alapján az 1980-as évek végére 2/3 részben a jól, illetve a jó-közepesen ellátott kategóriába kerültek (BALLÁNÉ, 1974; SARKADI & KÁDÁR, 1974; KÁDÁR et al., 1984).

1990-től kezdve rohamosan csökkent a műtrágya-felhasználás, s ezért mezőgazdasági termelésünk szempontjából nem közömbös, hogy a talajban visszamaradt P a növényi táplálkozás során hogyan hasznosulhat.

A talajban lévő, illetve visszamaradt foszfor hatékonyságának értékelése

A műtrágyázási stratégia kialakításánál, a trágyázási szaktanács elkészítésénél csak akkor lehet a talajban visszamaradt foszfort reálisan figyelembe venni, ha meg tudjuk határozni ennek a foszornak a trágyaértékét, azaz a korábban adott P pillanatnyi hatékonyságát, ill. felvehetőségét. (Ezt az angol nyelvű szak-

irodalomban "residual value"-nak nevezzük, s legtöbbször „RV”-vel jelölik.)

A talajban lévő, ill. visszamaradt P hatékonyságát, a "maradék értéket", egyrészt a növények oldaláról ún. biológiai módszerekkel, másrészt a talajok oldaláról ún. talajvizsgálati módszerekkel lehet megközelíteni.

Biológiai módszerek

Biológiai módszereket alkalmazva, a talajban lévő, ill. visszamaradt P felvehetőségét szabatos szabadföldi és tenyészedeny kísérletekben nevelt teszt-növényekkel lehet vizsgálni. Mivel a trágyázás célja elsősorban a termés növelése, ezekben a kísérletekben is elsősorban a termés alakulását vizsgálják. A P-trágyázás eredményének nyomon követésére azonban más növényi mutatók, pl. a növények P-felvétele, %-os P-tartalma, a zöld növényi részek tömege stb. is alkalmasak. A növények P-felvétele pl. abban az esetben válik lényeges mutatóvá, ha a növények termése a P-trágyázás hatására már nem növekszik, P-felvételük azonban még fokozódik.

A P-maradványok trágyaértékének meghatározására a legegyszerűbb eljárás az, amikor szabadföldi kísérletekben a frissen adott P-trágya hatására termett első évi terméshez (ún. főhatás) hasonlítják a következő - P-trágyázás nélküli - évek terméseit (ún. utóhatások) (MATTINGLY, 1971; BALLÁNÉ, 1974, 1979).

Mivel a szabadföldi kísérletek termésének, valamint a P-trágyázás hatásának, ill. utóhatásának alakulása az alkalmazott P-trágya fajtáján és mennyiségén kívül még számos más tényezőtől - pl. az időjárástól - is függ, ezért az egyik évben mért főhatásnak a következő évben mért utóhatással történő összehasonlítása helyett olyan eljáráshoz igyekeztek folyamodni, melynek segítségével a kísérleti évben mért utóhatást az ugyanabban a kí-

sérleti évben mért főhatáshoz lehet hasonlítani. Ezért akár szabadföldi, akár tenyészedeny kísérletben vizsgálják a P-trágyák utóhatását, vízben jól oldódó P-trágyával (legtöbbször szuperfoszfáttal) friss P-kezeléseket is állítanak be, s az utóbbi eredményeként kapott termést (vagy más jellemző értéket) veszik alapul a régebben P-trágyázott kezelések terméseinek (vagy más jellemzőinek) értékelésénél (MATTINGLY, 1971; WILLIAMS et al., 1971).

Ez utóbbi eljárás egyik változata az, amikor a régi trágyázási szintekkel kapott nagyobb méretű parcellákat kisebb parcellákra osztják fel, s ezeket a kisebb parcellákat trágyázzák a friss P-trágya különböző (növekvő) mennyiségeivel. Így minden „rég” parcellán a „friss” P_0 -kezelés a „rég” P utóhatását mutatja, a többi parcellán a „rég” és a „friss” P-trágyázás együttes hatását lehet mérni, s ebből azt is meg lehet állapítani, hogy a régebbi P-trágyázás milyen hatást gyakorol a „friss” P-trágyázás egyes szintjein (MATTINGLY, 1971; SARKADI & KÁDÁR, 1974; HOLLÓ et al., 1991).

A kísérleti adatokat ezekben a kísérletekben a legegyszerűbb módon a főhatásként kapott eredmény (termés) százalékában fejezték ki, s így hasonlították össze az utóhatást a főhatással.

A P-maradványok hatékonyságát azon az alapon is meg lehet becsülni, hogy mind a régebben, mind pedig a frissen adott P-adagok segítségével felrajzolják a termésgörbét, s a két görbéről grafikus úton becsülik meg a P-maradványok egyenértékét (WILLIAMS & REITH, 1971).

A termésgörbéket úgy is fel lehet rajzolni, hogy a vízszintes tengelyen a talajok P-mérlege szerepel, a függőleges tengelyen pedig a P-trágyázás hatására kapott terméstöbbletek (KÁDÁR & CSATHÓ, 1985).

Az eredményként kapott termésgörbéket nem grafikusán, hanem függ-

vények illesztésével értékelte SARKADI & KÁDÁR (1974) a P-trágya utóhatásának nagyságát vizsgáló szabadföldi kísérletekben. A P-maradványok hatásának vizsgálata céljából a "régi" P-trágyázási szintekre „friss” szuperfoszfátadagokat szórtak ki, s a kapott terméseredményekkel a „régi” P-trágyázás minden egyes szintjén felrajzolták a termésgörbét, melyekhez a legjobban másodfokú egyenleteket (parabolákat) tudtak illeszteni. Ezeknek az egyenleteknek a segítségével ki lehetett számítani, hogy egy bizonyos termés eléréséhez mennyi „friss” P-trágyára lett volna szükség. Ennek a „friss” P-trágya-mennyiségnek a segítségével ki lehet számítani a „régén” ténylegesen adott P-trágyaadag hatékonyságát.

A P-utóhatás vizsgálatára beállított tenyészedeny-kísérleteiben BARROW (1974) egy

$$\ln y = p - q \exp(-C_0 P)$$

alakú egyenletet illesztett (ahol y = a termés, $g/edény$, P = az adott szuperfoszfát mennyisége, $g/edény$, p , q és C_0 =oefficiensek). A p és q értékeket konstansnak véve, ebben az egyenletben kezelésenként csak a C -érték változott. BARROW ezután minden egyes kezeléshez tartozó egyenletből a kapott C_r -értéket az alapkezelés C -értékéhez (C_0) viszonyította; egy adott P-kezelés relatív hatékonyságát tehát a C_r/C_0 hányadossal fejezte ki.

A műtrágya-P hatékonyságának ilyen módon való kiszámítása azonban csak ideális esetben lehetséges - amint erre KUMAR et al. (1993) rámutattak - mégpedig abban az esetben, ha a termésgörbék azonos maximális termésértéket érnek el, ill. ha a p és q valóban azonosak. A legtöbb esetben különböző P-trágyákkal eltérő maximális termést, ill. maximális P-felvételt lehet csak elérni.

Az Ausztráliában P-utóhatást vizsgáló kutatók a "friss" és a "régi" P-trágyával kapott eredményeket három eljárással hasonlították össze (GOSCH & GILKES, 1987, COLWELL & GOEDERT, 1988, CHIEN et al., 1990, SAGGAR et al., 1993).

Mivel a különféle P-trágyákkal kapott termésgörbék a legtöbb esetben nem lineárisak és a maximális termés kialakulását eltérő mértékben befolyásolják, ezért a klasszikus Mitscherlich-egyenletből kapottoefficiensek arányát nem lehet a relatív hatékonyság becslésére felhasználni. Ehelyett, a termésgörbe tekintetbe vétele nélkül, a két összehasonlítandó műtrágya azonos mennyiségű P-t tartalmazó adagja hatására fejlődő terméseket, illetve terméstöbbleteket állítják arányba;

RY ill. RYI = (a vizsgált műtrágyával kapott termés ill. terméstöbbslet/a standard műtrágyával kapott termés ill. terméstöbbslet) x 100.

A terméstöbbletekkel kapható értékeket (RYI értékek) megbízhatóbbnak tartják, mert a P_0 -kezeléshez tartozó termés levonásával több zavaró tényezőt vissza lehet szorítani (pl. a termőhelyi hatást, a talaj kezdeti P-tartalmát, az időjárást stb.).

A fenti hányadost különben a „relative effectiveness” (viszonylagos hatékonyság) szavak kezdőbetűi alapján RE-értéknek is nevezik, s a P-utóhatás-vizsgálatoknál a „régi” P-hatására kapott termés, ill. terméstöbbslet és a „friss” P-hatására kapott termés, ill. terméstöbbslet hányadosát jelenti. Ha olyan kísérletet értékelnek ki, melyben nem adtak friss P-trágyát (pl. KUMAR et al., 1992), akkor az ugyancsak „régi”, de legjobb oldhatóságú P-trágyához hasonlítják a többi trágyával kapott eredményt, s ekkor a P-trágyák RRE-értékéről (relative residual effectiveness) beszélnek.

A fenti hányadossal kifejezett összehasonlítási módot vertikális összehason-

lításnak nevezik, mert a kapott terméseket - melyek ábrázolására a vertikális (függőleges) tengely szolgál - hasonlítják össze. Az így kapott RE-érték azt adja meg, hogy egy vizsgált műtrágya (pl. nyersfoszfát) hatékonysága a standardként használt műtrágya (pl. szuperfoszfát) hatékonyságának hányad része, függetlenül attól, hogy az alkalmazott P-mennyiség mindkét P-trágyában mekkora volt. Ezt az összehasonlítási módot akkor alkalmazzák, mikor mind a vizsgálandó, mind pedig a standard műtrágyával csak egy-egy kezelés áll rendelkezésre, s igen alkalmas arra, hogy többféle P-trágyát értékelés szempontjából sorba lehessen állítani.

A műtrágyázási kísérletek egyik lényeges kérdése azonban az, hogy azonos nagyságú termés eléréséhez mennyi P-trágya kell az egyik, és mennyi a másik fajtából, vagyis a P-trágyák mennyiségét kell összehasonlítani. Mivel a P-trágyák mennyiségét a horizontális (vízszintes) tengelyen szokták ábrázolni az ilyen kísérletek értékelésénél, ezért ezt az összehasonlítási módot *horizontális összehasonlításnak* nevezik. Ennél a számítási módnál nem elegendő egyetlen P-adaggal trágyázást végezni, hanem több P-trágyaadag alkalmazásával termésgörbét kell felvenni. GHOSH & GILKES (1987), BOLLAND et al. (1989), BOLLAND & GILKES (1990), HOLFORD & CROCKER (1991), BOLLAND (1992a, b, c) és KUMAR et al. (1992, 1993) az adott P-műtrágya adagok és a termések között kapott görbékhez legtöbbször egy Mitscherlich-típusú exponenciális függvényt illesztettek:

$$y = a - b \exp(-cx)$$

ahol x = az adott P-trágya, (kg P/ha); y = a termés (kg/ha) vagy a növények P-felvétele (kg P/ha); a , b , c = koeficiensek.

A kísérleti adatok feldolgozásánál mind a frissen adott, mind a régebben

adott P-trágyára vonatkozóan elvégzik a görbe illesztését, s a „friss” és a „rég” P-görbe összehasonlítása alapján számítják ki a régebben adott P-trágya hatékonyságát. Ha pl. a standard vagy „friss” szuperfoszfátból 30 mg P/kg talaj adag volt szükséges egy bizonyos termés eléréséhez, s egy nyersfoszfátból, vagy egy „rég” P-trágyából 55 mg P/kg talaj nagyságú adag ugyanekkora termés eléréséhez, akkor a standard műtrágyához képest $30/55=0,55$ a nyersfoszfát vagy a „rég” P-trágya hatékonysága. Ezt a hányadost nemcsak RE-értéknek, hanem SR-értéknek is nevezik az angol „substitution rate” kezdőbetűiből, mert ez az érték megadja, hogy mekkora P-trágyaadagok képesek egymást helyettesíteni.

A számítási eljárásokból nyilvánvaló, hogy a vertikális és horizontális összehasonlítás alapján nyert RE-értékek nem feltétlenül azonosak, sőt egyes esetekben igen nagy különbség lehet köztük (pl. GHOSH & GILKES (1987) egy ilyen adatpár esetében 1300 %-os különbséget is talált). Ezért ügyelni kell arra, hogy milyen alapon történt az RE-érték kiszámítása.

A harmadik összehasonlítási eljárás - mely a horizontális összehasonlítás speciális esete - a *lineáris termésgörbék összehasonlítása*. Mivel a különféle P-trágyákkal igen sok esetben nem lehet a maximális termést elérő, ún. teljes termésgörbét felvenni, s a gyakorlatban abban a tartományban érdemes P-trágyázást végezni, ahol jelentős termésnövekedés jelentkezik az egyes P-trágyaadagok hatására, ezért a görbék kezdeti (reaktív) szakaszait hasonlítják össze. A görbéknek ez a szakasza egyenes vagy majdnem egyenes, s az összehasonlítás alapját a görbék meredeksége képezi: a vizsgálandó műtrágyával kapott görbe kezdeti meredekségét osztják a standard vagy „frissen adott” műtrágyával kapott görbe kezdeti meredekségével. Ennek az összehasonlításnak lényeges pontja, hogy

meddig tekintik az egyenest egyenesnek, azaz az alkalmazott P-trágya-adagok közül hányat vonnak be a regresszió-számításba. A lineáris összehasonlítás alapján számított RE-értékek azonosak, akár vertikális, akár horizontális elv alapján történt az összehasonlítás, de csak arra a tartományra érvényesek, melyre a számítást végezték.

Gazdaságossági számítások esetében a horizontális összehasonlítás a megfelelő eljárás. Ha viszont egy standard műtrágyához viszonyítva több P-trágya, pl. nyersfoszfát hatékonyságát kívánják sorrendbe állítani, akkor a vertikális összehasonlítás a célszerű.

Talajvizsgálati módszerek

Mivel akár a tenyészedény-kísérletekkel, akár a szabadföldi kísérletekkel csak meglehetősen hosszú idő után lehet a talaj P-állapotára vonatkozó eredményekhez jutni, s így a talajban visszamaradt P felvehetőségének alakulásáról felvilágosítást kapni, a témával foglalkozó kutatók azt is megvizsgálták, hogy a talajban lévő, a növények számára többé-kevésbé felvehetőnek tekintett P kimutatására használt módszerek hogyan követik a trágyázás után a talajban visszamaradt P változásait.

A talajban visszamaradt P-mennyiség meghatározására LARSEN et al. (1965) a talaj labilis P-készletének nagyadagú műtrágyázás utáni változásának jellemzésére az ún. L-értéket alkalmazták. Ezt a talajhoz adott P^{32} aktivitás és a tenyészvényekben termett növényekben talált aktivitás arányából számították ki. Az alkalmazott P-trágya hatását a kontroll-parcellán és a trágyázott parcellán kapott L-érték különbsége adja (ΔL). Ez a ΔL érték a trágyázástól eltelt idővel exponenciálisan csökken. A talajokban visszamaradt P hatékonyságának jellemzésére LARSEN et al. (1965) az ún. felezési időt

vezették be. Ez az az időtartam, mely alatt szerintük a talajba juttatott P fele nem-labilis alakba megy át, amit az említett exponenciálisan csökkenő görbe linearizált (logaritmikus) alakjából számítottak ki. Vizsgálatukban a felezési idő talajonként változott, s az általuk vizsgált talajok nagy részénél 1 és 6 év között mozgott.

Az izotópos eljárás a felvehető P-tartalom meghatározására azonban bonyolult kivitelezhetősége miatt nem terjedt el széles körben. A kutatók és a gyakorlati szakemberek egyaránt inkább a különböző kivonószerek alkalmazását részesítették előnyben a „felvehető” P-tartalom meghatározásánál, s ezzel együtt a talajban visszamaradt P oldhatóságának ill. felvehetőségének nyomon követésénél.

A kivonószerek részletes tárgyalása előtt a talajban visszamaradt P (= residual P) talajban végbemenő átalakulását célszerű áttekinteni. Ezt MATTINGLY (1971), LARSEN (1971), BARROW (1974), RUSSELL (1977), BARROW (1980), SAROA & BISWAS (1989) MCCOLLUM (1991) és MENDOZA (1992) munkái alapján, a lejátszódó kémiai folyamatok részletes ismertetése nélkül, így lehet összefoglalni:

A talajba juttatott P-trágya - oldhatóságától függően - a talajoldatban feloldódik. Ez a folyamat a vízdoldható P-t tartalmazó műtrágyáknál gyors, néhány óra alatt lejátszódik.

A talajoldatból a P egy része gyors reakció során a szilárd fázis részecskéin adszorbeálódik. A foszfornak ebben a kötésben való maradását LARSEN (1965) szerint leginkább az ún. felezési idővel lehet jellemezni, vagyis azzal az időtartammal, mely alatt a „labilis” P-mennyiségnek a fele „nem-labilis” alakba megy át.

A talajban, adszorbeált állapotban visszamaradó, még labilis P, az előbb említetteknél jóval lassúbb reakciók egész során át, idővel egyre nehezebben oldódó, ill. a növények számára egyre

nehezebben felvehető vegyületekké alakul át.

A lassú átalakulási folyamat végén a P oldhatatlan, s így a növények számára felvehetetlen vegyületekben kötődik meg.

Ennek a folyamatnak eredményeképpen a talajban a műtrágya-P hatékonysága csökken. A csökkenés főbb tényezői RUSSELL (1977), BARROW (1980), MCCOLLUM (1991) és MENDOZA (1992) szerint a következők:

A növények P-felvételével a talaj-P mennyiségileg fogy, sőt a terméssel együtt el is kerül a szántóföldről. Az így elvitt P mennyisége függ a termesztett növényektől és a termesztés körülményeitől, de a rendszeresen trágyázott talajok esetében ez a P-mennyiség a talaj-P-t csak kismértékben csökkenti.

A foszforral kapcsolatban kimutatták, hogy általában nem mosódik ki a talajból, hanem a talajba kerülés helyén, ill. annak közelében marad (ezt pl. AULAKH & PASRICHA (1991), valamint MCCOLLUM (1991) kísérleteikben is kimutatták). Ennek ellenére jelentős P-vesztés léphet fel a felső talajrétegekben is pl. eróziótól sújtott területeken.

A legjelentősebb mértékben azonban a talajban a talajrézecsskéken adszorbeált P lassú átalakulása során keletkező, nehezebben felvehető P-vegyületek képződése következtében csökken a talajban visszamaradt trágya-P hatékonysága. (Ezt pl. MCCOLLUM (1991) kísérletileg is kimutatta.)

AULAKH & PASRICHA (1991) a P különböző mértékű megkötődésének és a P hatékonysága csökkenésének nyomon követésére a talaj-P-t frakcionálták. Eredményeik szerint a 8 éves szabadföldi kísérletük végén a talajban lévő P kb. 35 %-a volt a labilis, 46 %-a a szemi-labilis és 19 %-a a stabil frakcióban kimutatható. A labilis és szemi-labilis P 12-19 %-a szerves kötésben volt, ami könnyen

mineralizálódik és ezáltal felvehetővé válik.

Ugyanezt a lassú átalakulást MCCOLLUM (1991) szabadföldi tartamkísérletében követte nyomon, melyet az USA-ban, homokos vályogtalajon 35 éven át végzett, s a talaj felvehető P-tartalmát Mehlich-1 kivonószerezrel (MEHLICH, 1953) határozta meg. Mivel a kísérlet talaja eleinte foszforral jól ellátott volt, a P-trágyázás hatását ekkor csak a talajvizsgálati adatokkal (Mehlich-1-P = M-1-P) lehetett kimutatni. Az M-1-P-értékek - a legnagyobb P-trágyaadag kivételével - lineáris kapcsolatot mutattak a talajba juttatott P mennyiségével, s jól mutatták nemcsak az első évi nagyadagú P-trágyázás szintjeit, hanem az ezekre a későbbi évek során adott kisebb P-mennyiségek következtében beálló P-tartalom változásokat is. A talajba adott P-trágya oldhatósága a kontrollparcellákon már a kísérlet első 9 éve alatt is csökkent, s a 9. év végén a P_0 -parcellákon az első évben adott foszfornak csak a 17 %-a volt Mehlich-féle kivonószerezben oldható állapotban, míg a további 8 éven át még kis P-adagokkal trágyázott parcellák esetében a 9. év végén az adott foszfornak átlagosan még 28 %-a volt oldható állapotban. A kizárólag P-utóhatást vizsgáló periódusban (10.-35. év) a trágyázási periódus (első 9 év) alatt kialakult M-1-P-értékek folyamatosan csökkentek.

A kísérleti növények P-trágyázásra való reagálását vizsgálva látható, hogy a kísérlet elején csak a parcellák 10 %-án reagáltak a növények terméstöbblettel a trágyázásra, ezeken a parcellákon az M-1-P-értékek 18-20 g/m³-nél kisebbek voltak. A kísérlet utolsó éveiben már a parcelláknak majdnem 80 %-án lehetett P-hatást elérni, s ezt a M-1-P-értékek 18-20 g/m³ érték alá csökkenése is jelezte.

MCCOLLUM (1991) M-1-P-vel végzett vizsgálatai azt mutatták, hogy a 9 éves trágyázás alatt adott teljes P-mennyiségnek kb. a 2/3-a lassan „eltűnt”, azaz

olyan készletekbe ment át, melyekből a M-1-kivonószerezrel nem volt már kioldható. A P ezekből a készletekből természetes körülmények között olyan lassan alakul ismét vissza oldható, „felvehető” állapotba, hogy a növények P-igényét már nem tudja fedezni.

MATTINGLY (1971), WILLIAMS et al. (1971), RUSSELL (1971) és még számos más kutató többféle talajvizsgálati értéket abból a szempontból hasonlított össze, hogy milyen mértékben növekednek a P-trágyázás hatására, képesek-e kimutatni az alkalmazott P-trágya-adagok emelkedését, s a termés betakarítása után lehet-e ezekből az értékekből a talajban visszamaradt P mennyiségére ill. hatékonyságára következtetni. Ezekre a kérdésekre egyértelműen pozitív választ a fenti három munka során az L-érték, az ioncserélő gyantás P és az Olsen-P (OLS-P) értékeknél kaptak. Mivel e három módszer közül kivitelezhetősége szempontjából az Olsen-módszer a leggyorsabb és legegyszerűbb, ezért a P-utóhatás kísérleteknél az OLS-P változásának nyomon követését javasolták. Az AL-P-értékek mellett az OLS-P-értékeknek a talajban visszamaradt P jellemzésére való alkalmasságát SARKADI & KÁDÁR (1974) is igazolták úgy, hogy az OLS-P-értékeket a talaj P-mérlegével állították szembe. Az OLS-P-értékek igen jól követték a talaj P-mérlegének változását, az összefüggés lineáris és szignifikáns volt ($r = 0,76$).

SIMONIS & BLADENOPOULOU (1990) görögországi meszes talajokkal végzett tenyészedény-kísérletében a növények által felvett összes P-tartalommal a legjobban egyező eredményeket az anioncserélő gyantával kivont P-adatok adták (a felvett P 85 %-át mutatta ki, s a lineáris összefüggés korrelációs együtthatója $r = 0,936^{xxx}$ volt). Bár az Olsen-féle kivonószerezrel a talajokból csak a növények által összesen felvett foszfornak a 46 %-át lehetett kivonni, szoros lineáris kap-

csolat volt az OLS-P és a növények által felvett P között is ($r=0,824^{xxx}$). Az OLS-P-értékekkel igen jól lehetett követni a talajok felvehető P-tartalmának csökkenését a kísérlet folyamán ($r=-0,990/-0,996^{xxx}$).

MENDOZA (1992) a talaj-P időbeli csökkenését követte az OLS-P, BRAY-1-P és BRAY-2-P értékek vizsgálatával. Előzetesen foszforral trágyázott és inkubált talajokkal tenyészedény-kísérletet végzett, majd a talajokat a fenti kivonószerekkel elemezte. A vizsgált módszerek közül az OLS-módszert találta olyanoknak, mely az inkubációs idő növekedésével a legjobban követte a talaj felvehető P-tartalmának a csökkenését. A BRAY-1-P-értékek egyes talajoknál - de nem minden esetben - szintén beváltak, viszont a BRAY-2-P-értékek nem mutatták megfelelő mértékben a felvehető P időbeli csökkenését.

Ugyancsak az OLS-P-t tartották megfelelőnek a talajban lévő P változásának kimutatására AULAKH et al. (1991) szabadföldi és MENON et al. (1991) tenyészedény-kísérleteik eredményei alapján.

A COLLWELL (1963) által módosított NaHCO_3 -os módszerrel (=COL-P) végezték talajvizsgálataikat az ausztrál kutatók. Az alkalmazott műtrágya-P mennyisége és a COL-P-értékek között a kísérletek legtöbbször lineáris összefüggést mutattak ki, melynek korrelációs együtthatói $r=0,93-0,99$ között voltak (GHOSH & GILKES, 1987; BOLLAND, 1992a, 1993). Egyes kísérletek adatainál exponenciális egyenlettel volt leírható az összefüggés, melynek determinációs együtthatója ($R^2=0,99$) szintén szoros, szignifikáns kapcsolatra utalt (BOLLAND & BARROW, 1991; BOLLAND, 1992c).

A P-trágya maradványok felvehetőségének időbeli alakulását is nyomon követték a COL-P-értékek változásával (BOLLAND et al., 1984; GHOSH & GILKES, 1987; BOLLAND & BARROW, 1991; BOL-

LAND & GILKES, 1992). A kísérletekben az eredmények összehasonlítása alapját képező, vízdoldható P-t tartalmazó P-trágyák (SP, TSP, MCP) esetében a trágya kiszórásától eltelt idő előrehaladásával a COL-P-értékek jelentősen csökkentek. Nyersfoszfátok alkalmazása után viszont a COL-P-értékek a P-utóhatás éve alatt általában alig változtak (kivéve BOLLAND & GILKES (1992) kísérletét, ahol a 4 utóhatásévben a COL-P-értékek emelkedtek).

A COL-P-értékek alapján számított RE-értékek a fentiekkel majdnem azonosan viselkedtek: vízdoldható P-trágyák esetében az idővel egyenletesen csökkentek, nyersfoszfátok esetében egy érték körül ingadoztak. A növényi termés alapján számított RE-értékekkel összehasonlítva az látható, hogy míg a termés alapján számított RE-értékek általában az első és második termés között igen nagymértékben csökkentek, majd a további termések között kismértékű, lineáris csökkenés volt tapasztalható, addig a COL-P alapján számítottak mindvégig lineáris csökkenést mutattak (BOLLAND et al., 1984; GHOSH & GILKES, 1987; BOLLAND & GILKES, 1990; BOLLAND, 1992a, 1992c, 1993).

A Magyarországon a trágyázási szaktanácsadásban használt AL-módszer P-maradványok kimutatására való alkalmasságát BALLÁNÉ (1979), SARKADI & KÁDÁR (1974), KÁDÁR & CSATHÓ (1985) és HOLLÓ et al. (1991) vizsgálták. A talajban visszamaradt P mennyiségének megbecsülésére a talaj P-mérlegének adatait használták. BALLÁNÉ (1979) megállapította, hogy mindaddig, amíg a P-mérleg pozitív irányba tolódott el, az AL-P-értékek is nőttek. Amint a P-mérleg negatív irányba fordult, az AL-P-értékek csökkenni kezdtek. A P-mérleg és az AL-P adatainak összefüggése SARKADI & KÁDÁR (1974) és KÁDÁR & CSATHÓ (1985) kísérleteiben is igen szoros, lineáris volt ($r=0,82$, ill. $r=0,98$ -

0,99). Ugyanezekben a kísérletekben a szemtermés és a talaj AL-P-értéke között ugyancsak igen szoros, de nem lineáris kapcsolat állt fenn; a görbe 10-12 mg% AL-P-értéknél ellaposodott, vagyis az AL-P-értékek emelkedése ellenére a termés mennyisége nem nőtt tovább.

A széles körben használt OLS-P, COL-P és a Magyarországon használt AL-P mellett a P-utóhatás kimutatása szempontjából BOLLAND & GILKES (1992) a BRAY-1-, a CAL- és a TRUOG-eljárást; GAHOONIA et al. (1992) a CAL- és a van der Pauw-féle H_2O -módszert; SUNTHEIM et al. (1987) pedig a FLOSSMANN & RICHTER (1982) által kidolgozott folyamatos vizes kivonást vizsgálták meg. A TRUOG-módszer kivételével ezek a módszerek is alkalmasak a P-maradványok különböző mértékű kimutatására.

A talajok egyes tulajdonságainak hatása a P-hatásra, ill. -utóhatásra

A talajok egyes tulajdonságai, így pl. pH-juk, mésztartalmuk, P-adszorpciós képességük, mállottságuk befolyásolják a P-trágyák hatékonyságát, s ezzel együtt a P utóhatását is. A talajtulajdonságoknak a tápelemek felvehetőségére gyakorolt hatása rendkívül komplex, s ezért egy-egy talajtulajdonság hatását igen nehéz különválasztani, egyes tényezők hatását mégis meg kell külön is említeni (SUMNER & FARINA, 1986).

A P-trágyák esetében lényeges hatást lehet a talaj pH-jának, illetve savanyúságának tulajdonítani. Angliában, savanyú talajokon (pH(H_2O): 4,5-5,0) végzett szabadföldi kísérletekben szuperfoszfát és más foszfátrágyák esetében MCCONAGHY et al. (1971) csak az első utóhatásévben kaptak mérhető termés-többletet angolperjénél, a második utóhatásévtől kezdve már nem. Amikor vi-

szont ugyanezeket a talajokat $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$: 6,2-6,9 értékre meszezték, akkor mind a főhatás-, mind az utóhatásokban nagyobb termést mértek, s még a 4. utóhatásévben is volt mérhető termés-többlet.

A talaj savanyú, illetve meszes voltának hatását a P-trágya hatására ill. utóhatására nyomon lehet követni HOLLÓ et al. (1991) Kompolton (erősen savanyú agyagos vályogtalaj) és KÁDÁR et al. (1984, 1989), ill. CSATHÓ (1990) Nagyhorcskón (mészlepedékes csernozjom talaj) végzett szabadföldi kísérleteiben is. Míg Kompolton az utóhatás-periódus 3. évében lehetett még a „rég” P-szintektől függően eltérő szemterméstöbbletet mérni, s az utóhatás-periódus 6. évében már csak a legnagyobb „rég” P-szint gyakorolt némi hatást a termésre, addig Nagyhorcskón a „rég” P-trágyázás utóhatása még a 7.-8. kísérleti évben is olyan jelentős volt, hogy a „friss” P nem adott szignifikáns szemterméstöbbletet. Feltöltő trágyázás esetében is megmutatkozott a két talaj befolyása. Kompolton 900 kg P_2O_5 /ha-os feltöltő trágyázás 3. évi utóhatása 1,3 t/ha, 6. évi utóhatása már csak 0,6 t/ha búzaszem termés-többletet eredményezett. Nagyhorcskón ezzel szemben 720 kg P_2O_5 /ha P-trágya-adag mind az utóhatás 1.-4., mind pedig az 5.-8. évében 1,5-1,6 t/ha, de még a 20. évben is igazolható szemterméstöbbletet adott szintén búzájánál.

A talajok savanyú volta ill. savanyodása a nyersfoszfátok oldódását fokozza. Ez látható WILLIAMS et al. (1971) Angliában, különféle oldhatóságú P-trágyákkal végzett szabadföldi kísérleteiből is: a savanyú talajon ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$: 5,8-5,9) fekvő kísérleti helyeken a Gafsa-foszfát igen jelentős, a szuperfoszfát hatását esetenként meghaladó termést eredményezett az 1. és 2. utóhatásévben. GAHOONIA et al. (1992) tenyészedény-kísérletében a talaj pH-jának 2,2 egységgel történt csökkentése következtében a Thomas-,

Rhenánia- és hyperfoszfátos kezelésekben 12-33 %-kal megemelkedett a „felvehető” P-tartalom a talajban. KUMAR et al. (1992) szabadföldi kísérleteinél a savanyúbb ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$: 4,6) talajon az Észak-Karolina-i nyersfoszfát szuperfoszfát-maradványokhoz viszonyított hatékonysága (RRE-értéke) alig csekélyebb a szuperfoszfát-maradványok hatékonyságánál (RRE=0,87-1,04), míg a kevésbé reaktív Queensland-i nyersfoszfát RRE-értéke 0,1-0,25, tehát az utóbbira nem hatott a talaj savanyú volta.

CHEN & BARBER (1990) üvegházi kísérletben a talajok pH-ját ($\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$: 4,2-4,7) különböző adagú meszezéssel 4 eltérő pH-szintre állították be (max. pH: 8,3), majd 0-500 mg P/kg talajjal végzett trágyázás után meghatározták a talajoldat P-tartalmát és az anioncserélő gyantával kivonható P mennyiségét. A talajok pH-jának emelkedésével mindkét talaj-P-érték a három talajnál eltérő módon változott, mivel ezeknél a talajoknál - amint erre már SUMNER & FARINA (1986) is rámutatott - a P-tartalom és a pH (meszezés) közötti hatást a talajok aktív Al-tartalma (ill. mállottságuk foka) is befolyásolta. A CHEN & BARBER által vizsgált három talaj 2 %, 63 % és 88 % kicserélhető Al-ot tartalmazott, s ennek hatására a pH emelkedésekor a 2 % kicserélhető Al-ot tartalmazó talaj esetében a talajoldat P-tartalma csökkent, az anioncserélő gyantával kivonható P-tartalma pedig szignifikánsan nőtt. A másik két talajnál az anioncserélő gyantával kivonható P-tartalom a pH emelkedésével nagyjából állandó maradt, de a talajoldat P-tartalma a 63 % kicserélhető Al-ot tartalmazó talajnál pH=6,0 értékig emelkedett, majd kb. állandó maradt, míg a 88 % kicserélhető Al-ot tartalmazó talajnál pH=6,2 értékig csökkent, s innen kezdve a pH-val együtt emelkedett.

A talajok P-megkötő képessége - mely a kicserélhető Al mennyiségével együtt nő - szintén befolyásolta a talaj-

oldat P-koncentrációját: a talaj-pH átlagában a 2 % kicserélhető Al-ot tartalmazó talajnál a talajoldat P-koncentrációja a P-trágya-adagokkal meredeken emelkedett, a másik két talajnál (kicserélhető Al= 63 % ill. 88 %), melyeknek viszonylag nagy a P-adszorpciós kapacitása, csak a legnagyobb P-trágya-adag esetében volt kimutathatóan nagyobb a talajoldat P-tartalma, mint a kisebb P-adagoknál. Az anioncserélő gyantával kivonható P - a pH-értékek átlagában - mindhárom talajnál lineárisan emelkedett, s az egyenesek iránytangensei kb. azonosak voltak.

SAGGAR et al. (1993) a talajok kicserélhető Ca-tartalmának és P-szorpciós kapacitásának hatását is vizsgálták négy, eltérő tulajdonságú talaj esetében. A talajokat különböző reaktivitású nyersfoszfátokkal és standard-P-trágyaként MCP-vel (monokalciumpfoszfát) trágyázták. Angolperjével végzett tenyészedény-kísérletsorozat eredményeként megállapították, hogy akár a szárazanyag-terméssel, akár a növényi P-felvétellel számított RE-értékeket tekintették, a kis P-szorpcióval rendelkező talajokon a reaktívabb és kevésbé reaktív nyersfoszfátok egyaránt kevésbé hatékonyak (kisebbség az RE-értékeik), mint a nagy adszorpciós kapacitású talajoknál. A különféle nyersfoszfátok RE-értékére a talajok kicserélhető Ca-tartalmának is kimutatható hatása volt: a kevés kicserélhető Ca-ot tartalmazó talajokban valamennyi nyersfoszfát nagyobb hatékonyságot (nagyobb RE-értéket) ért el, mint a sok kicserélhető Ca-ot tartalmazókban.

HOLFORD & CROCKER (1991) legelőként hasznosított savanyú talajokon (pH (KCl): 4,6-5,4) tanulmányozták a talajok P-megkötő képességének hatását a P-trágya utóhatására. Szabadföldi kísérleteik (27 termőhely) eredményei alapján úgy tűnik, hogy a P hasznosulása az első évben (főhatás) a kis és közepes P-megkötő képességű talajokon jelentősen nagyobb (2-3-szoros) a nagy P-megkötő képességű

talajokon mértnél. Az utóhatásokban a helyzet azonban megváltozott - s SAGGAR et al. (1993) eredményeihez hasonlóan - a nagy P-megkötő képességű talajokon a P-hasznosulás ugyanakkora, vagy még nagyobb lett, mint a kis és közepes P-megkötő képességűeken. Ez a P-trágyák RV-értékeiben is megmutatkozott, bár csak a 2. kísérleti évben kapott RV-értékek és a talajok P-megkötő képessége között tudtak szoros, szignifikáns ($r = 0,75$) kapcsolatot kimutatni.

A kísérleti növények szerepe a P-utóhatásban

A növények P-hasznosítása ill. P-felvételének mértéke genetikai adottságon is alapszik, s így érthető, hogy azonos P-trágyázásra eltérően reagálnak a növények. A P-hatás, illetve P-utóhatás nagyságát viszont elsősorban növényi mutatókkal (termés, P-felvétel) mérik, ezért állapíthatták meg KUMAR et al. (1992), hogy a „műtrágyák utóhatás-értéke tulajdonképpen a növényfajoktól függ”. Ezt igen sokan észlelték és regisztrálták is. Pl. BALLÁNE (1974, 1979) a P-trágya utóhatását a kísérleti növények által összesen (kumuláltan) felvett P alapján értékelte. Megállapította, hogy a P-trágyázás leállítását a 12. kísérleti év után nem okozott törést a kísérleti növény (szudáni cirokfű) P-felvételében: a kísérlet 12.-16. évében a kumulált P-felvételel megadó egyenes ugyanolyan meredekséggel emelkedett, mint a P-trágyázás alatti években. A 16.-20. évig viszont némi csökkenés mutatkozott a P-felvételben, mivel ebben az időszakban őszi búzával vitte tovább a kísérletet. Az utolsó, 21. évben, ismét fokozódott a P-felvétel egy újabb kísérleti növény, a kukorica termesztésekor.

WILLIAMS & REITH (1971) egy 4 éven át végzett P-trágyázási kísérletben arra is kerestek választ, hogy az egyes években termesztett növények milyen mértékben

vesznek részt a P-utóhatás kimutatásában. A Rothamstedben végzett szabadföldi kísérletben, melyben a kezdetben adott nagyadagú P-trágya (240-480 lb/acre) hatását évenként adott 0-30-60-120 lb/acre P-trágya-adagok hatásával hasonlították össze, zab-takarmány répa-zab-széna vetésforgót alkalmaztak. Összességében vizsgálva, az évenként adott P-trágya esetében a takarmányrépa gyökértermése 45-66 %-ban járult hozzá az összes (4 évi) szárazanyag-terméshez, a zab szalmatermése 24-35 %-ban, a zab szemtermése viszont csak 10-22 %-ban. Az egyszeri nagyadagú P-trágyázás esetében (melynek 2.-4. kísérleti éve P-utóhatás) a takarmányrépa 41-47 %-ban, a zabszalma 42-44 %-ban, a zab szemtermése viszont csak 9-17 %-ban járult hozzá az összes szárazanyag-termékhez.

BOLLAND et al. (1989), AULAKH et al. (1991) és BOLLAND (1992a, 1993) munkáikban arra a kérdésre kerestek választ, vajon eltérő mértékben hasznosítják-e a növények nemcsak a különféle friss P-trágyákat, hanem a korábban adott szuper- ill. nyersfoszfát P-maradványait is. Ez a kérdés már azért is jogos, mert a szuperfoszfát jól oldódik, s ezért a talajban visszamaradó foszforjának nagy része adszorbeált állapotban van, míg a rosszul oldódó nyersfoszfátok visszamaradó foszforjának nagy része a még addig fel nem oldódott műtrágya-P-ból származik.

AULAKH et al. (1991) egy szabadföldi kísérletben, földimogyoró és búza vetésforgóval, 8 éven át vizsgálták a koncentrált szuperfoszfát direkt és utóhatását. A földimogyoró, mely a talaj natív P-tartalmára is jól reagált, a kontrollkezeléshez viszonyítva sem a friss, sem a régi P-trágya hatására nem adott szignifikánsan nagyobb termést, sem nagyobb P-felvételt nem mutatott. A búza viszont szignifikánsan reagált mind a frissen adott P-trágyára (terméstöbbség 35-54 %, P-fel-

vétel 177-228 %), mind pedig a régebben adott P-trágya maradványaira (terméstöbbség 16-41 %, P-felvétel 110-167 %). Ugyanakkor a termés és a P-felvétel adatai a P-trágya szintek emelkedését is követették, mind a direkt, mind pedig az utóhatás periódusában.

A kísérleti növények P-trágyára való reagálását BOLLAND et al. (1989) három szabadföldi kísérlet eredményei alapján hasonlította össze. Megállapították, hogy a korábban adott nyersfoszfátok RE-értékei a növényfajtától (csillagfűrt, búza, zab, repce, triticales) függetlenül megközelítően azonos kis értékek voltak (0,04-0,18). A korábban adott szuperfoszfátra kapott RE-értékek - az első kísérlet kivételével - a 2. és 3. kísérletben a növényektől függően eltértek egymástól (csillagfűrtnél: 0,33-0,37; zabnál: 0,28-0,31; árpánál: 0,67; tritcalenál: 0,14-0,15; repcénél: 0,25-0,27).

Hasonló eredményre jutott BOLLAND & BARROW (1991) szuperfoszfát-trágyázás direkt, valamint 1. és 2. évi utóhatását vizsgálva. Az RE-értékek árpánál mindkét utóhatásévben, csillagfűrtnél csak az 1. utóhatásévben az alkalmazott műtrágyaadagoktól függetlenek voltak (árpánál 0,65 [1. év], ill. 0,25 [2. év]; csillagfűrtnél 0,36). A búzánál mindkét utóhatásévben, a csillagfűrtnél csak a 2. utóhatásévben az RE-értékek még a P-trágya adagoktól függően is csökkentek (búzánál az első évben 0,57-0,25, a 2. évben 0,42-0,10 között; csillagfűrtnél 0,36-0,10 között).

BOLLAND (1992a, 1993), munkáiban ausztráliai legelőkön a here (*T. subterraneum*) mellett újabban termesztett takarmánynövényeknek (*M. polymorpha*, *O. compressus*, *M. murex*) a talajban maradt szuperfoszfát (1992a, 1993), ill. nyersfoszfát (Queensland-i nyersfoszfát, 1993) P-maradványaira való reagálását vizsgálta. A növények reagálását P-igényükkel, ezt pedig az ún. RPR-értékkel jellemezte. (Az RPR-értéket [= relative P

requirement] tenyészedény-kísérletben kapott termések és a régi ill. a friss műtrágyaadagok közötti összefüggésekre kapott görbékből számította ki. A görbék segítségével mindegyik növénynél kiszámította a maximális termés 50, ill. 90 %-ának eléréséhez szükséges P-mennyiséget mindegyik P-trágya esetében, s ezt tekintette az adott növény P-igényének. Majd valamennyi növény P-igényét elosztotta annak a növénynek a P-igényével, mely a maximális termés 50, ill. 90 %-át a legkevesebb P felhasználásával tudta előállítani: ez a hányados az RPR-érték.)

A három 1992-es tenyészedény-kísérletnél a kapott termésgörbék lefutása ugyan eltérő volt, de az RPR-értékek nem mutattak szisztematikus különbséget egyik növény esetében sem (pl. az *O. compressus* nem igényelt minden sorozatban kevesebb P-t, mint a here), így az eredményekből nem lehetett arra következtetni, hogy az újonnan alkalmazott takarmánynövények más-más módon reagálnak a szuperfoszfát maradványaira.

Az 1993-ban leírt kísérletben ugyanazeknek a takarmánynövényeknek a szuperfoszfát és a Queensland-i nyersfoszfát maradványaival szembeni viselkedését is megvizsgálta BOLLAND (1993). Azonos termésszint eléréséhez a legkevesebb frissen adott szuperfoszfátot az *O. compressus* igényelte, 10-50 %-kal kevesebbet, mint a *M. polymorpha* és a here. Az első vágáskor a *M. polymorpha*, a 3. vágáskor a here P-igénye volt a legnagyobb. A „rég” P-trágyákból - a szuperfoszfátból és a nyersfoszfátból egyaránt - az *O. compressus* igényelte viszont a legtöbb foszfort, nyersfoszfátból az 1. vágásnál 50 %-kal, a 3. vágásnál 200 %-kal többet, mint a *M. polymorpha*, és 35 %-kal ill. 100 %-kal többet, mint a here; szuperfoszfátból pedig átlagosan 200 %-kal igényelt többet a másik két növénynél.

KUMAR et al. (1992) kísérletükben rávilágítottak arra, hogy a növények ún. „külső” P-igénye hogyan befolyásolhatja a műtrágyák utóhatás-értékét. Tenyészedény-kísérletükben 3 eltérő „külső” P-igényű növényrel dolgoztak; a salátával, mely a maximális termés 75 %-ának eléréséhez a talajoldatban 0,18 mg/l P-t igényel, a búzával, mely közepesen P-igényes (0,03-0,15 mg P/l) és a csekély P-igényű kukoricával (0,005-0,01 mg P/l). A kísérlet talajai (pH: 4,6 és 6,5) szabadföldi kísérletekből származtak, ahol a 6 évvel korábbi P-trágyázást triple-szuperfoszfáttal (=TSP), kétféle nyersfoszfáttal és Calciphos-szal végezték. A tenyészedény-kísérletben friss szuperfoszfátos kezelés nem volt, ezért a nyersfoszfátok utóhatását a szuperfoszfát-maradványok hatásához (azaz az utóhatáshoz) hasonlították (vagyis RE-értékek helyett RRE-értékeket számítottak). Az eredmények egyértelműen bizonyították, hogy a P-utóhatás mérésénél igen fontos szerepe van a növények „külső” P-igényének: a rendkívül csekély „külső” P-igénnyel rendelkező kukorica tudta a TSP- és a nyersfoszfát-maradványokat a leghatékonyabban értékesíteni, különösen a 6,5 pH-jú semleges talajon: a RRE-értékek a kukorica termésével számolva 1,5-2,5-ször voltak nagyobbak ($RRE_{kuk} = 0,14-0,98$), mint a búza termésével számolva ($RRE_{búza} = 0,09-0,60$) és 1,5-4-szer voltak nagyobbak, mint a salátatermessel kapottak ($RRE_{sal} = 0,04-0,64$). A növények P-tartalmával számolva a kukoricánál kapott értékek ($RRE_{kuk} = 0,12-0,77$) 1,3-2,3-szorosai voltak a búzánál kapottaknak ($RRE_{búza} = 0,09-0,34$), és 1,3-3,0-szorosai a salátánál kapottaknak ($RRE_{sal} = 0,04-0,60$). Tehát a kukorica a nyersfoszfátok utóhatás-értékét akár háromszor nagyobbak jelezheti, mint a saláta.

Az egyes növényfajták „külső” P-igényét az ún. „belső” P-hatékonyság is befolyásolja, ezért a P-utóhatás vizsgálatoknál ezt a tényezőt sem hagyhatják fi-

gyelmen kívül. A P „belső” hatékonyságán a növények termése és P-felvétele közötti összefüggést értik. Ha ez az összefüggés lineáris, akkor a P-felvétel egyenletes emelkedésével a termés mennyiége is egyenletesen nő. Ha nem lineáris, akkor nagyobb mennyiségű P felvétele esetén a P „belső” hatékonysága csökken, s a termés nem emelkedik arányosan a P-felvétellel. Mivel a P-trágyák RE-értékeit mind a termések, mind pedig a növényi P-felvétel alapján számítják, a P „belső” hatékonyságának ismerete támpontot nyújt a kétféle alapon számított RE-értékek alakulására (KUMAR et al., 1993; SAGGAR et al., 1993).

BOLLAND et al. (1989) előbb említett 5 tesztnövényüknél, ill. BOLLAND & GILKES (1990) szabadföldi kísérletük zab tesztnövényénél a P belső hatékonysági görbéjének alakulását függetlennek találták az alkalmazott P-trágya típusától, valamint az alkalmazás időpontjától és módjától. BOLLAND (1992b) gabonafélékkel végzett szabadföldi kísérleténél a termés és a P-felvétel közötti összefüggést egyazon kísérleti évben azonos egyenlettel tudta leírni, akár fő-, akár utóhatásról volt szó, de takarmánynövényekkel végzett kísérleteiben (BOLLAND, 1992a és 1993) azt tapasztalta, hogy növényenként, vágásonként és P-műtrágyánként más-más lefutású görbéket kapott.

KUMAR et al. (1992) két szabadföldi kísérletükben általában a fentiekkal egyező eredményekre jutottak a P belső hatékonyságát illetően. Kivételt képezett a Queensland-i nyersfoszfáttal savanyú (pH=4,6) talajon végzett trágyázás. Ebben az esetben a búza és a saláta belső hatékonyságát megadó egyenesek meredekebbek voltak a többi műtrágyával kapottaknál, vagyis ebből a nyersfoszfátból származó P belső hatékonysága az átlagosnál nagyobb volt. A másik eltérés a 6,5 pH-jú semleges talajon jelentkezett, ahol a kukoricánál a TSP-vel végzett trá-

gyázás után a P belső hatékonysága kisebb, a görbe laposabb lefutású volt, mint a többi trágya esetében. Ezek az eltérések a szerzők szerint esetleg egy másik tápelem hiányának, vagy egy toxikus tényező jelenlétének voltak tulajdoníthatók.

A P belső hatékonyságával foglalkozva valamennyi munkában megállapítják, hogy a nyersfoszfátok gyenge hatékonysága nem annak a következménye, hogy a növények a nyersfoszfátból származó foszfort kisebb mértékben vennék fel, hanem annak, hogy kisebb mennyiségben áll a növények rendelkezésére, mert rosszul oldódik.

A P-trágya típusa és a P-utóhatás

Több országban már hosszabb ideje használnak nyersfoszfátokat P-trágyázás céljára, s ezekkel - főként savanyú talajokon - jó P-trágyahatást értek el. GHOSH & GILKES (1987) arra mutatnak rá, hogy a nyersfoszfátokkal kapcsolatban olyan nézet is elterjedt, hogy a direkt (első évi) hatásuk csekély ugyan, de utóhatásuk egyes esetekben nagyobb lehet, mint a jól oldódó P-trágyáké. Eszerint tehát a nyersfoszfátok a vízzoldható P-trágyákat bizonyos helyzetekben helyettesíteni lennének képesek. E kérdés vizsgálatánál a P-trágyák két nagy csoportját hasonlítják össze: a vízben jól oldódó P-trágyákat (szuperfoszfát (=SP), triple-szuperfoszfát (=TSP), monokalciumfoszfát (=MCP) stb.) és a vízben rosszul vagy alig oldódókat (részben feltárt nyersfoszfátok, nyersfoszfátok).

A vízben jól oldódó P-trágyák, a részben feltárt nyersfoszfátok és a nyersfoszfátok trágyaként való hatékonyságát szabadföldi kísérletekben (WILLIAMS et al., 1971; BOLLAND et al., 1989; BOLLAND & GILKES, 1990; BOLLAND et al., 1984; BOLLAND & BARROW, 1991; BOLLAND, 1992b; KRÁMER & LAMBERGER, 1965) és tenyészedény-kísérletekben (GHOSH &

GILKES, 1987; KUMAR et al., 1992, 1993; BOLLAND, 1993; SAGGAR et al., 1993; BALLÁNÉ, 1978, 1979a, 1981; KRÁMER, 1962, 1963) hasonlították össze. Valamennyi kísérlet eredményéből - a kísérleti növényektől és a talajok tulajdonságaitól függetlenül - megállapítható, hogy a vízzel oldható trágyák eredményezik a legnagyobb termést nemcsak a kísérlet első évében (főhatás), hanem az utóhatás években is, annak ellenére, hogy az első évi terméshez képest a második évi (1. utóhatás) termés mindig jelentősen kisebb (60-85 %-kal): pl. GHOSH & GILKES (1987) szerint a régi MCP hatékonysága a friss MCP-éhez képest, terméseredményekkel számolva kb. 75 %-kal, a növényi P-felvétellel számolva kb. 60 %-kal csökkent (RE=0,25 ill. 0,39 lett) búza esetében. BOLLAND et al. (1989) 1. és 2. kísérletében a régi szuperfoszfát hatékonysága a friss TSP-éhez viszonyítva RE=0,25-0,30, a 3. kísérletben RE=0,15-0,30 között volt. BOLLAND et al. (1984) azt tapasztalta, hogy a vizsgált legelő parcelláinak szárazanyag-termésével számolva a régebben adott szuperfoszfát hatékonysága az utóhatás első évében kb. 70 %-kal, majd a következő 4 év alatt még további 14 %-kal csökkent. BOLLAND (1993) tenyészedény-kísérletében a kezdetben adott „rég” szuperfoszfát hatékonysága a „friss” SP-éhoz képest, a búza termése alapján számolva, az 1. és 2. termés között kb. 60 %-kal, majd a 4. termésig még 25 %-kal csökkent.

A fenti kísérletek szerint a részben feltárt és natív nyersfoszfátok hatékonysága mind a főhatás évében, mind pedig az utóhatásokban jelentősen kisebb, mint a friss szuperfoszfáté, de még a „rég” szuperfoszfáténál is csekélyebb [főhatás RE=0,33-0,1 (GHOSH & GILKES, 1987), utóhatás, friss TSP-hez viszonyítva RE=0,20-0,05 (BOLLAND et al., 1989); az utóhatás a SP vagy a TSP utóhatásához viszonyítva RRE=0,04-0,30 (KUMAR et al., 1992); a részben feltárt Calciphos

esetében ugyanezek RE- ill. RRE-értékek sorra: 0,15-0,30; 0,09-0,20; 0,60-0,98]. Az, hogy a nyersfoszfátok RRE-értékei is egynél kisebbek az esetek legnagyobb részében, azt mutatja, hogy az SP- és TSP-maradványok hatékonysága - az utóhatás-periódusban bekövetkező nagyfokú hatékonyság-csökkenés ellenére - nagyobb, mint a nyersfoszfátok maradványainak hatékonysága (azaz utóhatása).

Egyes esetekben savanyú talajokon, nyersfoszfátokkal is jelentős P-trágyahatást értek el. Így pl. WILLIAMS et al. (1971) már idézett kísérleteiben. A két savanyú talajú kísérleti telepen jelentős volt a Gafsa-foszfát utóhatása; elérte, sőt esetenként meg is haladta a SP utóhatását.

KUMAR et al. (1992) az egyik tenyészedény-kísérletükben savanyú talajt (pH: 4,6) használtak. Ezen a talajon a kísérletben alkalmazott kétféle nyersfoszfát (Észak-Karolina-i és Queensland-i) hatékonysága igen jelentős volt, akár a növények termése alapján végezték a számítást ($RRE_{EK}=0,87-1,04$; $RRE_{QU}=0,09-0,45$), akár a növények P-felvétele alapján számoltak ($RRE_{EK}=0,74-0,92$; $RRE_{QU}=0,05-0,45$). Tehát a reaktívabb Észak-Karolina-i nyersfoszfát megközelítette, sőt esetenként meg is haladta a SP-maradványok hatékonyságát. Ilyen nagy, az 1,0-t megközelítő, esetleg meghaladó értékeket csak RRE-értékek számításánál lehet kapni, amikor a nyersfoszfát-maradványok hatékonyságát a SP-maradványok hatékonyságához viszonyítják. Erre, s arra a tényre, hogy az ilyen eredmények értékelésénél óvatosan kell eljárni, mutatott rá GHOSH & GILKES (1987), mikor több indiai nyersfoszfát hatékonyságát vizsgálta.

GHOSH & GILKES (1987), valamint BOLLAND & GILKES (1990) a különböző P-trágyák relatív hatékonyságát (RE-értékét) a talajok COL-P-tartalma alapján is kiszámították. A MCP-vel végzett trá-

gyázás után a talaj COL-P-értéke már az első termés vetése és aratása között eltelt idő alatt jelentősen csökkent, s az 1. és 2. termés után mért COL-P-értékek között 66 %-os volt a különbség. GHOSH & GILKES (1987) kísérletében az alkalmazott nyersfoszfátok 0,5 M NaHCO_3 -ban való oldhatósága az egész kísérlet alatt alig változott, s ezért, amikor a nyersfoszfátos kezelés COL-P-értékeit a „rég” MCP-kezelések COL-P-értékeihez viszonyították, akkor a nyersfoszfátok hatékonysága emelkedni látszott. Valójában - a termést tekintve - a nyersfoszfátok utóhatása nem volt jelentősebb, mint az első termésnél jelentkező direkt (fő-) hatásuk. BOLLAND & GILKES (1990) szabadföldi kísérletének eredményeiből pedig látható, hogy a SP-P kivonhatósága COL-P-vel mérve, a kísérlet 5 éve alatt 75-80 %-kal, a Calciphos-é kb. 25 %-kal, a nyersfoszfáté pedig kb. 60 %-kal csökkent. A szuperfoszfát kivonhatóságának ilyen nagymértékű csökkenése ellenére, a kiszórás utáni 8. ill. 12. évben a szuperfoszfátos kezelésekből 3x, ill. 1,2x annyi P-t lehetett kivonni, mint a Calciphos-kezelésekből és kb. 11x ill. 9x annyit, mint a nyersfoszfátos kezelésekből, azonos mennyiségű hatóanyag adagolása után.

A P-trágyáknál nemcsak a kémiai összetétel, de a fizikai tulajdonságok, így pl. a szemcsézettség is kihatnak a P-hatás ill. utóhatás nagyságára. Ezzel kapcsolatban KUMAR et al. (1993) tenyészedény-kísérletet végzett MCP-vel, részlegesen feltárt nyersfoszfáttal (=PARP) és Észak Karolina-i nyersfoszfáttal (=NCRP), szemcsézett (G) és por (N) alakjában adagolva a trágyákat. A legnagyobb termést hozó, leghatékonyabb kezelés a MCP-G kezelés volt, az első vágásnál (főhatás) éppen úgy, mint a másodiknál (utóhatás). Az MCP-N hatékonysága a PARP-G hatékonysága alatt maradt. A leggyengébb hatékonyságot a NCRP-G mutatta, gyengébbet, mint amit a NCRP-

N-nel el lehetett érni. (A MCP-G-hez viszonyítva a NCRP-N hatékonysága a talajtól is függően, $RE=0,04-0,20$; az NCRP-G hatékonysága $RE=0,02$ volt.) A második vágásnál a NCRP-G hatékonysága $RRE=0,1$ -re emelkedett, ami részben annak tudható be, hogy a MCP hatékonysága (utóhatása) a második vágásnál jelentősen csökkent. A NCRP-N hatékonysága az első vágás $RE=0,04$ értékéről a második vágáskor $RRE=0,18$ -ra emelkedett, de megemelkedett a PARP-G és a PARP-N hatékonysága is.

A P-trágya talajban való elhelyezésének módja is hatással van a P-trágyák hatékonyságára. Akár vízben jól oldódó P-trágyákkal (SP, TSP, MCP), akár nyersfoszfátokkal trágyáztak, nagyobb P-hatást és utóhatást kaptak abban az esetben, amikor a P-trágyákat egy rétegben (sávban) helyezték el a talajban, mint amikor bekeverték ill. bedolgozták a talajba. Ezt mind tenyészedény, mind pedig szabadföldi kísérletekben tapasztalták (WILLIAMS & REITH, 1971; BOLLAND & GILKES, 1990; SUNTHEIM et al., 1987; KUMAR et al., 1993.).

A P-trágya talajba kerülésétől eltelt idő hatása a műtrágya-P hatékonyságára

Ezzel a kérdéssel foglalkozik tulajdonképpen a P-trágya utóhatását vizsgáló valamennyi munka, vannak azonban olyan kísérletek, melyekben a talajba került P hatékonyságát a kísérlet során több időpontban is meghatározták.

WILLIAMS & REITH (1971) Angliában szabadföldi kísérletekben takarmányrépa és zab jelzőnövényvel vizsgálta ezt a kérdést. A szabadföldi kísérletek egy részénél a szuperfoszfát trágyát (0-120 lb $\text{P}_2\text{O}_5/\text{acre}$) különböző időpontokban (tavasszal talajművelés előtt ill. után, előző ősszel szántás előtt ill. után) adta és mérte a terméstebbleteket. Ennek alapján megállapították, hogy a friss szuperfosz-

fáthoz képest a szuperfoszfát-maradványok hatékonysága a talajba történő bedolgozás következtében 50 %-ára, az őszi szántástól a tavaszi vetésig (kb. fél év alatt) 33 %-ára, egy évi talajjal való érintkezés után 25 %-ára, majd további 6-9 év alatt 3 %-ára csökken. Ezek a %-os értékek az idő függvényében ábrázolva exponenciálisan csökkenő görbét adnak, melynek kezdeti szakasza igen gyorsan csökken, de a továbbiakban ez a csökkenés erősen lelassul.

MCCONAGHY et al. (1971) két savanyú (pH (H₂O): 4,5 és 4,9) talajjal végzett tenyésztedény-kísérletben angolperje jellemző növényt a vetés előtt 6 ill. 3 héttel és a vetéskor trágyáztak oldható ortofoszfáttal. A trágyázás és a vetés között eltelt rövid időtartam következtében az idővel az előbbieknél kevésbé csökkenő relatív terméshozamokat mértek: a vetéskor trágyázott növényekhez képest a 6 héttel korábban trágyázott növények termése 19-33 %-kal, a 3 héttel korábban trágyáztak termése 4-13 %-kal volt kevesebb.

SUNTHEIM et al. (1987) egy talajérlelés és két tenyésztedény-kísérletben vizsgálták a P-trágya hatékonyságának időbeli csökkenését. Az inkubációs kísérletben egy homok- és egy vályogtalajhoz adott KH₂PO₄-oldat folyamatos vizes kivonással (FLOSSMANN & RICHTER KWE-módszere, 1982) meghatározható P mennyiségének csökkenését követték. A talajok vízzel kivonható P-tartalma mindkét talajnál az első 3 nap alatt csökkent a legnagyobb mértékben (25 % ill. 36 %-kal). A homoktalajnál a 6. nap után a kivonható P-tartalom a vizsgálat további 12 hónapja alatt állandó maradt (a kiindulási érték 70 %-át tette ki), a vályogtalajnál még hosszabb időn át volt állandó csökkenés mérhető, s a 12. hónapra a kiindulási érték 47 %-át érte el a vízzel kivonható P-tartalom. Ugyanezekkel a talajokkal klímakamrában tenyésztedény-kísérletet végeztek kukorica növényekkel, melyben 3 ill. 1 héttel, 3 nappal és

közvetlenül vetés előtt adták a KH₂PO₄-oldatot. A trágyázás és a vetés között eltelt idő hosszával csökkent a P-trágya hatékonysága: a vetéskor trágyázott növények szárazanyag-hozamához képest a 3 héttel korábban trágyáztak 46 %-os, ill. 72 %-os termést hoztak, P-felvételük pedig csak 22 ill. 70 %-ot ért el a vályog-, ill. a homoktalajon. Végül egy másik homoktalajjal egy Mitscherlich-típusú tenyésztedény-kísérletet végeztek szintén kukoricával. Az ősszel, tavasszal (=4 héttel a vetés előtt) és vetéskor adott szuperfoszfát hatására a kukorica szárazanyaghozama a vetéskor trágyázott növényekéhez képest az őszi trágyázás esetében 8-20 %-os, a tavaszi trágyázás esetében 47-58 %-os volt.

Homoktalajon végzett szabadföldi kísérletben BOLLAND & BARROW (1991) a parcellákat harmadolva, a parcellák 1/3-án 2 évvel, a másik harmadon 1 évvel a vetés előtt, a harmadik harmadon közvetlenül vetés előtt trágyáztak 0-455 kg P/ha-os adagokkal, majd az egész területet csillagfürttel, árpával és búzával vetették be úgy, hogy valamennyi kísérleti növény a frissen trágyázott és az 1, valamint a 2 éves P-maradványokon nőtt. A két utóhatásévben a növények termése alapján számított RE-értékek a következőképpen alakultak:

Trágyázás éve	Csillag- fürt	Árpa	Búza
	termésével számított RE-érték		
1987 (friss P)	1,0	1,0	1,0
1986 (1 éves utóhatás)	0,36	0,65	0,57- 0,25*
1985 (2 éves utóhatás)	0,36-0,10	0,25	0,42-0,10

* A P-adagtól függően

A búza 1 és 2 éves, a csillagfürt 2 éves utóhatáskor kapott RE-értékei a P-trágya-adagoktól is függtek, a kisebb P-

adagoknál nagyobb volt a RE-érték, a nagyobbaknál kisebb.

Ugyancsak BOLLAND (1992c) egy búza-csillagfürt vetésváltós szabadföldi kísérletben nagyadagú P-trágyázás után (0-450 kg P/ha) három éven át vizsgálta a kezdetben (1986-ban) adott szuperfoszfát utóhatását, évenként friss szuperfoszfát-trágyázáshoz viszonyítva az eredményeket. A termésgörbékből számított RE-értékek a következők voltak:

Év	Búza	Csillagfürt
	termésével számított RE-értékek	
1987 (1. utóhatás év)	0,25	0,28
1988 (2. utóhatás év)	0,26	0,25
1989 (3. utóhatás év)	0,14	0,19

Tehát a szuperfoszfát-maradványok hatékonysága az első két utóhatásévben a friss szuperfoszfáthoz képest 70-80 %-kal, a harmadik utóhatásévben még további 10 %-kal csökkent.

BOLLAND & BARROW (1991) és BOLLAND (1992c) azonos kísérleti növényekkel dolgoztak, de más kísérleti helyeken, más-más trágyázási eljárást alkalmazva. Ezzel magyarázható, hogy kísérleteikben a szuperfoszfát hatékonysága nem azonos mértékben csökkent. De nem azonos mértékű a szuperfoszfát hatékonyságának csökkenése BOLLAND (1992c) azon szabadföldi kísérletében sem, melyben csillagfürt-zab-búza vetésforgót alkalmazott, s a kísérlet felépítése következtében a csillagfürttel mindig a friss trágyahatást, a zabbal az 1. évi, a búzával a 2. évi utóhatást, s végül két alkalommal (1988-ban és 1989-ben) csillagfürttel a 3. évi utóhatást mérte. A szuperfoszfát hatékonysága még a frissen adott szuperfoszfát esetében is évről-évre nagymértékben ingadozott, az utóhatások még erősebb

ingadozást mutattak. A csillagfürttel számított két egymás utáni évben kapott 3. évi utóhatásra igen eltérő RE-értékeket kapott BOLLAND: 0,30-at 1988-ban, 0,12-t 1989-ben. Tehát az azonos korú szuperfoszfát-maradványok hatékonysága azonos kísérleti növényekkel mérve is kísérleti évenként igen eltérő értékeket adhat.

A hőmérséklet és a talaj nedvességtartalmának hatása a P-hatásra ill. -utóhatásra

Mivel a növények táplálkozása - tápelem- és vízfelvétele - alacsonyabb hőmérsékleten visszاسzorul, ill. magasabb hőmérsékleten fokozódik, ez a két tényező (a hőmérséklet és a talaj nedvességtartalma) is jelentős szerepet játszik a talajba került P hatásának ill. utóhatásának alakulásában.

SINGH & JONES (1977) talajjal végzett inkubációs és salátanövénnel végzett klímakamra-kísérleteiből a P-utóhatás szempontjából a következő eredményeket lehet kiemelni. Adataikból megállapították, hogy a talaj által adszorbeált P mennyisége a hőmérséklet emelkedésével nő, ami egyben azt is jelenti, hogy a talajoldatban kevesebb P marad vissza. Eredményeik azt is mutatták, hogy ugyancsak a hőmérséklet emelkedésével - az adszorbeált P minden szintjén - arányosan több P deszorbeálódott. Ez utóbbi tény a növények P-táplálása és a P-trágya utóhatása szempontjából igen lényeges, mert a talajrészecskékről deszorbeálódó P tölti fel újból a talajoldat P-koncentrációját a növények táplálása szempontjából megfelelő szintre. A klímakamrában végzett tenyészedény-kísérlet azt mutatta, hogy a foszforral nem kezelt edényekben is megháromszorozódott a saláta termése, miközben a növények környezetének hőmérsékletét 12,7 °C-ról fokozatosan 29,4 °C-ra emelték, tehát a hőmérséklet emelkedésének hatására a talaj

eredeti P-tartalmát is jobban tudták a növények hasznosítani vagy az eredeti P-tartalom felvehetősége is fokozódott. A P-hatás a kisebb P-szinteken (0,12-0,24 ppm P) a hőmérséklet emelkedésével nőtt, a nagyobb P-szinteken (0,36-0,72 ppm P) csak az alacsonyabb hőmérsékleteken emelkedett, a két magasabb hőmérsékleten kb. azonos volt.

Tápoldatos és tenyésztedény-kísérletekben vizsgálta MACKAY & BARBER (1984) a hőmérséklet hatását a növények P-felvételére. Tenyésztedény-kísérleteikben, amikor a talaj és a levegő hőmérséklete egyaránt 25 °C volt, akkor a P₀-szinten kapott terméshez képest a P₂-szinten kapott kukoricatermés a 2,8-szorosára, a P-felvétel pedig 3,9-szeresére nőtt, míg a 18 °C-on ugyanezek a szorzószámok csak 1,8-, ill. 1,9-nek adódtak. A magasabb hőmérsékleten a növények gyökereinek hossza és felszíne is nagyobb volt, ami a tápanyagfelvétel fokozódását elősegítette. Amikor a P₁-kezelésű talaj hőmérsékletét 18 °C-on tartották, s a levegő hőmérsékletét pedig 25 °C-ra emelték, akkor a 18 °C-on (talaj + levegő) tartott P₁-kezelésű növényekhez képest a termés kb. 4,3-szorosára, a P-felvétel pedig 2,2-szeresére emelkedett.

A tápoldatos kísérletekből megállapították, hogy a növények P-felvétele és a tápoldat P-koncentrációja között fennálló összefüggést a Michaelis-Menten egyenlettel lehet közelíteni:

$$I_n = \frac{I_{\max} (C_{IO} - C_{\min})}{(K_m + C_{IO} - C_{\min})}$$

ahol: I_n = a nettó influx (felvétel); I_{\max} = a maximális influx nagy C_{IO} -nál; C_{IO} = az oldat koncentrációja a gyökér felületénél; C_{\min} = annak az oldatnak a P-koncentrációja, melyben $I_n = 0$; $K_m = C_{IO} - C_{\min}$, akkor, ha $I_n = \frac{1}{2} I_{\max}$.

Mivel a növények P-felvétele több tényező egyidejű hatásán, illetve kölcsönhatásán alapul, ezért azt is megvizsgálták, hogy a hőmérsékletnek 18 °C-ról 25 °C-ra való emelésekor az egyenlet paraméterei közül melyik befolyásolja a legnagyobb mértékben az összefüggést. A legkifejezettebb hatást a gyökernövekedés mind hosszirányú, mind felületi sebességét jellemző paraméter gyakorolja, ez a tényező a fenti hőmérséklet-emelkedés következtében kb. 5-szörösére nőtt. Ez az eredmény megegyezett a tenyésztedényekben tapasztaltakkal.

BARROW (1974) tenyésztedény-kísérletében kifejezetten a P-utóhatás szempontjából vizsgálta a talaj hőmérsékletének és nedvességtartalmának a befolyását. Vizsgálatainál egyetlen talajjal dolgozott, melyhez a hőmérséklet-változás hatásának vizsgálatok a termésgörbe meredeken emelkedő szakaszát meghatározó P-adagokat adott növekvő mennyiségben hét szinten. A talaj nedvességtartalmát egy adott szintre állította be és a talajokat 10-35 °C között (6 szinten) 0-217 napon át (6 különböző időtartamig) inkubálta. A talaj nedvességtartalmának hatását egy másik tenyésztedény-kísérletben vizsgálta: 10 P-szint mellett a talajok nedvességtartalmát légszáraz és telített állapot között - azaz 1,6 % és 33 % víztartalom között - 6 szintre állította be, s 25 °C-on 186 napig inkubálta a mintákat. A talajokban lévő P hatékonyságát az inkubáció után növénykísérlettel tesztelte. A nem-inkubált és az inkubált talajokon kapott termések segítségével kiszámította mindegyik kezelésnél a relatív hatékonyságot, s ezt az egyes hőmérsékleti ill. nedvességtartalom szintekhez tartozóan az inkubációs idő függvényében ábrázolta. A kapott görbéről megállapította, hogy a talaj nedvességtartalmának emelkedésével a P relatív hatékonysága csökkent. A csökkenés a légszáraz állapotban (1,6 % nedvességtartalom) és a hervadáspontnál (6,1 % nedvességtarta-

lom) végzett inkubálások között volt a legnagyobb, 6-10 % nedvességtartalom között valamivel kisebb mértékű volt a csökkenés, majd 10,5 % nedvességtartalom felett megközelítően állandó maradt. Az inkubáció hőfoka is befolyásolta a P hatékonyságát. Alacsony hőmérsékleten (10 °C) a P hatékonysága sokkal kisebb mértékben csökkent (217 nap alatt kb. 30 %-kal), mint magasabb hőmérsékleten. A legnagyobb vizsgált hőmérsékleten (35 °C) a 217 napos inkubációs idő végén a nem-inkubált talajhoz viszonyítva 80 %-kal csökkent a szuperfoszfát hatékonysága.

A talajban lévő ill. visszamaradt foszfor átalakulásának leírása modellek segítségével

A P-utóhatás ill. a P-maradványok talajbeli viselkedésének ismeretében - a kérdéssel részletesen foglalkozó szerzők szerint - e maradványok átalakulását ill. változását leíró modelleket lehet kidolgozni, s a modellek segítségével a P-trágyázás stratégiájára vonatkozóan lehet megállapításokat tenni.

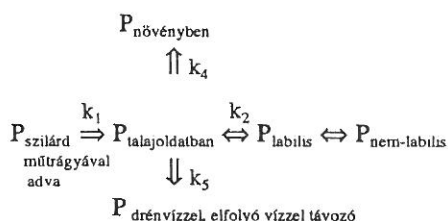
A talajban visszamaradó tápanyagok felvehetőségét a növények számára kétféle - biológiai vagy kémiai - eljárásokkal becsülhetjük meg. A biológiai felvehetőséget általában a termés mennyiségének (vagy a növények P-felvételének) változásával mérik és a változás leírására szolgáló egyenletek paramétereit szabadföldi vagy tenyészedény-kísérletekből nyert adatokkal becsülik meg. Az így kialakított függvények ún. *mechanisztikus modelleket* eredményeznek. Ezek a modellek részletes információt adhatnak a P-utóhatás megértéséhez, nyomon követik a talajban végbemenő tápanyag-átalakulásokat, egyes tényezőket azonban direkt úton mérni nem lehet, csak a növények reakciójának (termésének, P-

felvételének) ismeretében lehet megbecsülni őket.

A P-utóhatás hosszabb időtartam alatti becsülésére használt másik modell fajta az ún. *deszkriptív modell*. Ezek felírásához a talajból kémiai eljárásokkal kivonható tápanyagok változásait kell ismerni. Ez a modell fajta a talajban lejátszódó folyamatokra magyarázatot nem ad.

A kétféle modell hiányosságait kívánta kiküszöbölni SAROA & BISWAS (1989), mikor egy ún. *szemi-deszkriptív modellt* dolgoztak ki, melyben a direkt úton mérhető mennyiségek változásait vették tekintetbe.

A *mechanisztikus modellek* alapjának LARSEN-nek (1971) a foszfor talajban történő átalakulására felírt vázlatát tekinthetjük. Műtrágyázáskor a talajba került foszfor LARSEN szerint a következő módon alakul át:



Ebben a modellben LARSEN a labilis állapotban lévő foszfort tekinti annak a P-frakciónak, mely az adott P-trágyából a növények szükségletének kielégítése után, a további növénytermesztés számára felvehető állapotban marad vissza a talajban. Az idő előrehaladásával azonban a labilis P nem-labilis alakba megy át. LARSEN véleménye szerint a nem-labilis P sem hatástalan: ha a talaj labilis P-készlete kimerült, akkor a nem-labilis P-készlet kezd visszaalakulni labilis foszforra, méghozzá az időben legutóbb megkötött rész alakul vissza a leghamarabb. Ezt LARSEN kísérletileg is igyekezett kimutatni. Kísérleti eredményei alapján LARSEN (1971) kijelenti, hogy ahhoz,

hogy a talajban egy bizonyos P-szintet fenn lehessen tartani, a trágyaadagok megállapításánál - veszteséggént - tekintetbe kell venni a labilis P nem-labilis állapotba való átalakulását, a növények P-felvételét és minden egyéb okból bekövetkező P-vesztést, valamint - nyereséggént - az adott időpontig még nem reagált P-trágya maradványok és a nem-labilis P-készlet mobilizálódását.

LARSEN (1971) modelljét alapul véve alakította ki modelljét RUSSELL (1977) azzal a különbséggel, hogy a fel-nem-vehető (nem-labilis) P visszaalakulásának sebességét külön tényezőként vette figyelembe. Az általa felírt egyenleteket CARTER (1970) egyik megfelelő felépítésűnek tartott szabadföldi kísérletének adataival tesztelte.

Ezt a modellt BARROW & CARTER (1978) felülvizsgálták, s több becsült tényezőnél rámutattak, hogy az összefüggések valójában eltérnek a RUSSELL (1977) által feltételezettéktől (pl. a műtrágyával adott foszfor és a felvehető alakban lévő P nem áll lineáris kapcsolatban a P-vesztésekkel stb.). Azt is megállapították, hogy RUSSELL (1977) esetleg nem a legmegfelelőbb módon járt el, amikor a modell tesztelésekor CARTER (1970) ún. 2. kísérletének adatait alkalmazta, szerintük az 1. kísérlet megfelelőbb lett volna. Ilyen és hasonló észrevételek alapján javaslatot tettek a modellbe behelyettesítendő értékek becslésének módosítására.

JONES et al. (1984), BARROW & CARTER (1978), COX et al. (1981) és mások elgondolásait felhasználva egy, szerintük, LARSEN (1971) és RUSSELL (1977) modelljeinél egyszerűbb modellt szerkesztettek, mellyel a talajnak a növények számára leadható P-tartalmát és a növények által felvett P-t, végül pedig ezek alapján az optimális termés eléréséhez szükséges P-műtrágya mennyiségét becsülni lehet. A talaj-P átalakulását felvázoló modelljük lényegében nem különbözik a LARSEN

(1971) és RUSSELL (1977) által felvázolt modellektől, azonban a talajban és a növényben található foszfort megkötődésének helye és erőssége szerint még felosztották labilis, aktív, stabil, szerves és szervetlen foszfor-frakciókra a talajban, ill. a szemekben, a hajtásokban és a gyökerekben található foszforra a növényen belül. Ezeknek a P-készleteknek ismert, ill. mért adatok segítségével történő becsléséhez igen sok paraméter (pl. a talajok labilis szervetlen P-tartalma, szervesanyag-tartalma, nedvességtartalma, a növények hajtásának P-tartalma stb.) felhasználásával számos egyenletet ismeretnek (SHARPLEY et al., 1984, 1989), melyek alapján el lehet jutni a növények rendelkezésére álló P-készlet ismeretéhez. A modellt JONES et al. (1984) által végzett tartamkísérletekben mért adatokkal tesztelték. A labilis alakban visszamaradó műtrágya-P mennyiségével (figyelembe véve a természetű növények P-igényét és a talajok labilis P-koncentrációját is) kiszámították, valamint a modellel szimulálták azt a P-műtrágya mennyiséget, mely kukorica és búza termesztése esetén a P-hiány elkerüléséhez szükséges. A kétféle módon meghatározott P-trágya mennyisége közötti különbség négy tartamkísérlet közül háromban nem volt 0,1 %-os valószínűségi szinten szignifikáns. A modell alkalmazási lehetősége azonban - a szerzők szerint - korlátozott. Csak olyan talajok esetében használható, melyek fizikai és kémiai tulajdonságai a kezdeti talaj-P-készlet nagyságának becslésére használt regressziós egyenletek által lefedett tartományon belül esnek.

WOLF et al. (1987), JANSSEN et al. (1987) és JANSSEN & WOLF (1988) bírálják az előzetesen kidolgozott mechanisztikus modelleket, mivel ezekben a modellekben a talajban lévő P-t többféle kötöttségi állapotban veszik figyelembe (elsősorban JONES et al. (1984)-re vonatkozik ez a kritika). Az ilyen, sok ténye-

zövel dolgozó modellt a gyakorlatban nehezen lehet alkalmazni, mert az egyes tényezők becslése sokszor nehézségekbe ütközik. Ezért WOLF és munkatársai eleendőnek tartják, ha egy, a folyamatokat összességében tekintve vevő modell áll abból a célból rendelkezésre, hogy a P-trágyázás első évi hatását, majd a későbbi években mérhető utóhatását meg lehessen becsülni. Modelljük ezért egyszerűbb, mint JONES et al. (1984) modellje, az adott műtrágya-P mennyiségén kívül a növényi tényezőket a termés mennyiségével ill. a benne lévő foszforral, a talajbeli tényezőket a labilis, stabil és natív-P mennyiségével veszi figyelembe. A modellel történő számításához az alkalmazott műtrágya mennyiségét és típusát, a növények P-felvételét a trágyázatlan (kontroll) és a trágyázott parcellákon a trágyázás utáni első évben, a natív P mennyiségét, valamint a labilis és stabil P-készletek egymás közötti átalakulásának sebességét (az ún. időkonstansokat) kell ismerni. Ezen adatok ismeretében, a talajok tápanyag-mérlegének számításához hasonló módon, WOLF és munkatársai olyan számítási eljárást dolgoztak ki, mellyel több évre előre meg lehet becsülni a talajban maradó P-mennyiséget, ennek várható hatását, s így a várható termést is. A modell tesztelését JANSSEN és munkatársai (1987) egy braziliai, egy ausztrál és egy madagaszkári szabadföldi kísérlet adataival végezték el, ezek a kísérletek ugyanis nagyrészt rendelkeztek a számításokhoz szükséges adatokkal. A számítások eredményeként megállapítható, hogy az előre-becsült termések és a kísérletek során mért termések - a legnagyobb P-adagoktól eltekintve - jól egyeztek. A szerzők a modellt igen alkalmasnak tartják a műtrágya-P tartamhatásának előrebecslésére, de figyelmeztetnek ugyanakkor, hogy egyetlen év várható termését nem lehet ilyen módon becsülni.

Cox et al. (1981) egy deszkriptív modellt fejlesztettek ki a tápelemek utó-

hatásának becslésére. A modell alapösszefüggése

$$\frac{dX}{dT} = -k(X - X_{eq})$$

mellyel a kémiai úton a talajból kivont tápanyag (X , kg/ha) mennyiségének időbeni változását (dX/dT) adják meg (X_{eq} = az egyensúlyi tápanyagszint). Ennek az alapösszefüggésnek a segítségével kialakított modellt Cox et al. (1981) hét tartamkísérlet adataival tesztelte. A talaj felvehető P-tartalmának kivonására a négy kanadai és a Rothamsted-i kísérlet esetében az OLSEN et al. (1954) féle kivonószert ($0,5 M NaHCO_3$), az USA-beli három kísérlet esetében a MEHLICH (1953) féle kivonószert ($0,05 N HCl + 0,025 N H_2SO_4$, kettős savas vagy Mehlich-1) használták. A kísérletekből nyert, mért adatokkal és a modellel számított talaj-P adatokkal korreláció számítását végeztek: az USA-beli talajok esetében $r = 0,96$, a kanadai talajoknál $r = 0,95-0,99$, és a Rothamsted-i talajnál $r = 0,87$ értékű korrelációs koefficienszt kaptak. A szerzők szerint, ennek a modellek a segítségével meg lehet határozni azt a P-trágya mennyiséget, mely az adott talajban egy kívánt P-szint eléréséhez szükséges.

Áttekintve az irodalomban található modelleket SAROA & BISWAS (1989) megállapították, hogy a mechanisztikus modellek ugyan részletesebb információt adnak a P-utóhatás megértéséhez, azonban a modellekkel való számoláshoz több tényezőt - mivel direkt úton mérni nem lehet - más adatok segítségével kell megbecsülni. A deszkriptív modellek a kémiai úton kivonható tápanyagok változásának meghatározásán alapulnak. A kivonható tápanyag szintjének időbeli csökkenése ugyan gyakran leírható egy exponenciális egyenlettel, de ezekben a modellekben is vannak olyan tényezők,

melyeket más változókból kell becsülni. Ezért SAROA & BISWAS (1989) azt tűzték ki célul, hogy olyan modellt állítsanak fel, melyben közvetlenül mérhető tényezők szerepelnek. COX et al. (1981) modelljéből indultak ki, s ezt úgy módosították, hogy az alkalmazott műtrágya mennyisége ($=F$) és a learatott terméssel elvitt P-mennyiség ($=R$) szerepeljen benne, mint két biztosan meghatározható mennyiség. E két változó segítségével a kivonható P időbeni változását a következőképpen írták fel:

$$\frac{dX}{dT} = X_0 + F(C) - R$$

ahol: X = a kivonható P (kg/ha); X_0 = a kivonható P kezdeti szintje (kg/ha); F = az alkalmazott műtrágya mennyisége (kg P/ha); C = a felvehetőségi koefficiens; R = a learatott terméssel elvitt P mennyisége (kg/ha).

Ezt az egyenletet évenkénti adatokra is fel lehet írni, de hosszabb periódusra is össze lehet vonni, s ha az adott műtrágya mennyisége és a terméssel elvitt P mennyisége ismert, akkor az évenkénti vagy a több évre szóló változások kiszámíthatók.

A modell használhatóságát indiai, különböző talajtípusokon végzett műtrágyázási tartamkísérletek adataival tesztelték. A kísérleti helyek $\frac{3}{4}$ -én (8-ból 6-on) igen jó egyezést ($r = 0,99^{**}$) találtak a modellel számított és a mért talajvizsgálati adatok (OLS-P-értékek) ill. változásuk között. A jó egyezést mutató kísérleteknél pozitív volt a P-mérleg, s az adott P-trágya mennyiségének növekedésével arányosan emelkedett a P-mérleg is. A pozitív P-mérleg az OLS-P-értékekben is tükröződött, s azt jelezte, hogy ezekben a talajokban jelentős P-megkötődés nem volt, ill. a P-megkötődés és a natív forrásokból felszabaduló foszfor kb. azonos mennyiségű volt. Ezeknél a tala-

joknál tehát a modellt fel lehet arra használni, hogy egy adott OLS-P-érték fenntartásához szükséges műtrágya-P mennyiségét ki lehessen számítani.

Azon a két kísérleti helyen azonban, ahol a mért és a modellel számított értékek között nem találtak szoros egyezést, ott a terméssel elvitt foszfor mennyisége - eltérő okokból - messze meghaladta a műtrágyával adott P mennyiségét.

Irodalom

- AULAKH, M. S. & PASRICHA, N. S., 1991. Transformations of residual fertilizer P in a semi-arid tropical soil under eight-year peanut-wheat rotation. *Fert. Res.* **29**. 145-152.
- AULAKH, M. S. et al., 1991. Long-term effects of rate and frequency of applied P on crop yields, plant available P, and recovery of fertilizer P in a peanut-wheat rotation. *Soil Sci.* **151**. 317-322.
- BALLA, H., 1974. The value of residual fertilizer NPK and phosphorus in a long-term experiment. *Agrokémia és Talajtan.* **23**, (Suppl.) 86-92.
- BALLA A.-NÉ, 1978. Különböző vízzoldhatóságú foszforműtrágyák hatása a termésre és a talaj AL- és Olsen-P-tartalmára tenyészedeny-kísérletben savanyú és meszes talajon. *Növénytermelés.* **27**. 311-322.
- BALLA A.-NÉ, 1979. Szemcsés és poralakú P-műtrágyák hatásának összehasonlítása tenyészedeny-kísérletekben. *Növénytermelés.* **28**. 449-459.
- BALLA A.-NÉ, 1980. A foszfortrágyázás utóhatásának vizsgálata. Az intenzív műtrágyázás hatása a talaj termékenységére c. ankét előadásai. MTA-TAKI. Budapest 130-138.
- BALLA A.-NÉ, 1981. Foszfortrágyák megkötődését jelző érleléses kísérletek különböző talajokon. *Növénytermelés.* **30**. 21-28.
- BARROW, N. J., 1974. The slow reactions between soil and anions: 1. Effects of time, temperature, and water content of a soil on the decrease in effectiveness of

- phosphate for plant growth. *Soil Sci.* **118**. 380-386.
- BARROW, N. J., 1980a. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Chapter 13. 333-359.
- BARROW, N. J. 1980b. Differences among some North American soils in the rate of reaction with phosphate. *J. Environ. Qual.* **9**. 644-648.
- BARROW, N. J. & CARTER, E. D., 1978. A modified model for evaluating residual phosphate in soil. *Aust. J. Agric. Res.* **29**. 1011-1021.
- BOLLAND, M. D. A., 1992a. Residual value of superphosphate measured using yields of different pasture legume species and bicarbonate-extractable soil phosphorus. *Fert. Res.* **31**. 95-110.
- BOLLAND, M. D. A., 1992b. The current and residual value of superphosphate for lupins grown in rotation with oats and wheat on a deep sandy soil. *Fert. Res.* **31**. 319-329.
- BOLLAND, M. D. A., 1992c. Residual value of superphosphate for wheat and lupin grain production on a uniform yellow sandplain soil. *Fert. Res.* **31**. 331-340.
- BOLLAND, M. D. A., 1993. Residual value of superphosphate and Queensland rock phosphate measured using yields of serradella, burr medic and subterranean clover grown in rotation with wheat and bicarbonate-extractable soil phosphorus. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **24**. 1243-1269.
- BOLLAND, M. D. A. & BARROW, N. J., 1991. The effect of level of application on the residual value of superphosphate on a sandy soil in south-western Australia. *Fert. Res.* **9**. 163-172.
- BOLLAND, M. D. A. & GILKES, R. J., 1990. Cultivation reduces fertilizer residual effectiveness and affects soil testing for available phosphorus. *Fert. Res.* **24**. 33-46.
- BOLLAND, M. D. A. & GILKES, R. J., 1992. Evaluation of the BRAY-1, calcium acetate lactate (CAL), TROUG & COLWELL soil tests as predictors of triticale grain production on soil fertilized with superphosphate and rock phosphate. *Fert. Res.* **31**. 363-372.
- BOLLAND, M. D. A., WEATHERLEY, A. J. & GILKES, R. J., 1989. The long-term residual value of rock phosphate and superphosphate fertilizers for various plant species under field conditions. *Fert. Res.* **20**. 89-100.
- BOLLAND, M. D. A. et al., 1984. The current and residual value of superphosphate, Christmas Island C-grade ore, and Calciphos as fertilizers for subterranean clover pasture. *Fert. Res.* **5**. 335-354.
- BRAY, R. M. & KURTZ, L. T., 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.* **59**. 30-45.
- CARTER, E. D., 1970. Phosphorus requirements of the Seddon soil series on Kangaroo Island, South Australia. *M. Agr. Sci. Thesis*, Univ. of Adelaide.
- CHEN, J. H. & BARBER, S. A., 1990. Effect of liming and adding phosphate on predicted phosphorus uptake by maize on acid soils of three soil orders. *Soil Sci.* **150**. 844-850.
- CHIEN, S. H., SALE, P. W. G. & FRIESEN, D. K., 1990. A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness of phosphate fertilizers varying in solubility. *Fert. Res.* **24**. 149-157.
- COLWELL, J. D., 1963. The estimation of phosphorus fertilizer requirements in southern New South Wales by soil analysis. *Aust. J. Expt. Agric. Anim. Husb.* **3**. 190-197.
- COLWELL, J. D. & GOPEDERT, W. J., 1988. Substitution rates as measures of the relative effectiveness of alternative phosphorus fertilizers. *Fert. Res.* **15**. 163-172.
- COX, F. R., KAMPRATH, E. J. & MCCOLLUM, R. E., 1981. A descriptive model of soil test nutrient levels following fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45**. 529-532.
- CSATHÓ P., 1990. A foszfor tartamtrágyázás hatásai mészlepedékes csernozjomon. *Melioráció, öntözés és talajvédelem*. **1**. 45-53.
- EGNÉR, H., RIEHM, H. & DOMINGO, W. 1960. Untersuchung über die chemische Bodenanalyse als Grundlage für die Beurteilung des Nährstoffzustandes der Böden. II. Chemische Extraktionsmethoden zur Phosphor- und Kaliumbestimmung.

- Kungl. Lantbrukshögsk. Ann. **26**. 199-215.
- FLOSSMANN, R. & RICHTER, D., 1982. Extraktionsmethode zur Charakterisierung der Kinetik der Freisetzung von P aus der festen Phase des Bodens. Arch. Acker- und Pflanzenbau und Bodenkd., Berlin. **26**. 703-709.
- GAHOONIA, T. S., CLAASSEN, N., & JUNGK, A., 1992. Mobilization of residual phosphate fertilizers in relation to pH in the rhizosphere of ryegrass. Fert. Res. **33**. 229-237.
- GHOSH, A. K. & GILKES, R. J., 1987. The initial and residual agronomic effectiveness of some Indian, USA and Australian rock phosphates. Fert. Res. **12**. 201-218.
- HELYAR, K. R. & GODDEN, D. P., 1976. The biology and modelling of fertilizer responses. J. Aust. Inst. Agric. Res. **43**. 22-30.
- HOLFORD, I. C. R. & CROCKER, G. J., 1991. Residual effects of phosphate fertilizers in relation to phosphate sorptivities of 27 soils. Fert. Res. **28**. 305-314.
- HOLLÓ S., CSATHÓ P. & SARKADI J., 1991. A foszfor műtrágyázás hatékonysága kukorica-tavaszi árpa-őszi búza vetésváltásban egy csernozjom barna erdőtalajon. Növénytermelés. **40**. 51-66.
- JANSSEN, B. H., LATHWELL, D. J. & WOLF, J., 1987. Modeling long-term crop response to fertilizer phosphorus. II. Comparison with field results. Agron. J. **79**. 452-458.
- JANSSEN, B. H., WOLF, J., 1988. A simple equation for calculating the residual effect of phosphorus fertilizers. Fert. Res. **15**. 79-87.
- JONES, C. A., SHARPLEY, A. N. & WILLIAMS, J. R., 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: III. Testing. Soil Sci. Soc. Am. J. **48**. 810-813.
- JONES, C. A. et al., 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: I. Documentation. Soil Sci. Soc. Am. J. **48**. 800-804.
- KÁDÁR I. & CSATHÓ P., 1985. A szuperfoszfát tartamhatásának vizsgálata őszi búza-monokultúrában. II. Fajlagos hatékonyság, tápelemtartalom és -felvétel, a P-előregedés vizsgálata, fenológiai megfigyelések. Agrokémia és Talajtan. **34**. 97-129.
- KÁDÁR I., CSATHÓ P. & SARKADI J., 1984. A szuperfoszfát tartamhatásának vizsgálata őszi búza-monokultúrában. I. Talajvizsgálati és szemtermés-eredmények. Agrokémia és Talajtan. **33**. 375-390.
- KÁDÁR I., CSATHÓ P. & SARKADI J., 1989. A talaj PK ellátottsága és a PK trágyázás hatékonysága közötti összefüggés meszes csernozjom talajon. Agrokémia és Talajtan. **38**. 78-82.
- KRÁMER M., 1962. Adatok az észak-afrikai (Hyper) és izraeli (Cyklon) foszfátok műtrágyahatásáról. I. Szemcsefinomság és fajlagos felület vizsgálata. Agrokémia és Talajtan. **11**. 345-354.
- KRÁMER M., 1963. Adatok az észak-afrikai (Hyper) és izraeli (Cyklon) foszfátok műtrágyahatásáról. II. Az oldhatóság laboratóriumi vizsgálata. Agrokémia és Talajtan. **12**. 275-284.
- KRÁMER M. & LAMBERGER I., 1965. Hazai adatok a nyersfoszfátok érvényesüléséről. MTA IV. Osztály Közleményei. 411-416.
- KUMAR, V., GILKES, R. J. & BOLLAND, M. D. A., 1992. The residual value of rock phosphate and superphosphate from field sites assessed by glass-house bioassay using three plant species with different external P requirements. Fert. Res. **32**. 195-207.
- KUMAR, V., GILKES, R. J. & BOLLAND, M. D. A., 1993. The agronomic effectiveness of reactive rock phosphate, partially acidulated rock phosphate and monocalcium phosphate in soils of different pH. Fert. Res. **34**. 161-171.
- LARSEN, S., 1971. Residual phosphate in soils. Min. Agric. Fisheries and Food, Techn. Bull. London. **20**. 34-41.
- LARSEN, S., GUNARY, D. & SUTTON, C. D., 1965. The rate of immobilization of applied phosphate in relation to soil properties. J. Soil Sci. **16**. 141-148.
- MACKAY, A. D. & BARBER, S. A., 1984. Soil temperature effects on root growth and phosphorus uptake by corn. Soil Sci. Soc. Am. J., **48**. 818-823.
- MACKAY, A. D. et al., 1986. A simple model to describe the dissolution of phosphate rock in soils. Soil Sci. Soc. Am. J. **50**. 291-296.

- MATTINGLY, G. E. G., 1971. Residual value of phosphate fertilizers on neutral and calcareous soils. *Min. Agric. Fisheries and Food, Techn. Bull. London*, **20**, 1-15.
- MCCOLLUM, R. E., 1991. Buildup and decline in soil phosphorus: 30-year trends on a typic Umprabult. *Agron. J.* **83**, 77-85.
- MCCONAGHY, S., MCALLISTER, J. S. V. & DICKSON, D. A., 1971. Residual value of phosphates in relation to soil conditions. *Min. Agric. Fisheries and Food, Techn. Bull., London* **20**, 80-88.
- MEHLICH, A., 1953. Determination of P, K, Na, Ca, Mg and NH_4 . Soil Test Div., Mimeo, N. C. Dept. Agr., Raleigh.
- MEHLICH, A., 1978. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* **9**, 477-492.
- MEHLICH, A., 1984. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* **15**, 1409-1416.
- MENDOZA, R. E., 1992. Phosphorus effectiveness in fertilized soils evaluated by chemical solutions and residual value for wheat growth. *Fert. Res.* **32**, 185-194.
- MENON, R. G., CHIEN, S. H. & GADALLA, A. N., 1991. Comparison of OLSEN and Pi soil tests for evaluating phosphorus bio-availability in a calcareous soil treated with single superphosphate and partially acidulated phosphate rock. *Fert. Res.* **29**, 153-158.
- OLSEN, S. R. et al., 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *US Dep. Agric. Circ. No.* 939.
- PAAUW, VAN DER F., 1969. Die Entwicklung und Verwertung einer neuen Wasserextraktionsmethode für die Bestimmung der Phosphorsäure im Boden. *Landwirtsch. Forsch.* **22**, Sonderheft **23/II**, 102-109.
- RUSSELL, J. S., 1977. Evaluation of residual nutrient effects in soils. *Aust. J. Agric. Res.* **28**, 461-475.
- RUSSELL, R. D., 1971. Residual phosphate experiments on the Sherborne Soil Series. *Min. Agric. Fisheries and Food, Techn. Bull. London* **20**, 95-100.
- SAGGAR, S. et al., 1993. Assessment of relative agronomic effectiveness of phosphate rocks under glasshouse conditions. *Fert. Res.* **34**, 141-151.
- SARKADI, J. & KÁDÁR, I., 1974. The interaction between phosphorus fertilizer residues and fresh phosphate dressings in a chernozem soil. *Agrokémia és Talajtan.* **23**, (Suppl.) 93-100.
- SAROA, G. S. & BISWAS, C. R., 1989. A semi-descriptive model for predicting residual-P from fertilizer P applications. *Fert. Res.* **19**, 121-126.
- SCHÜLLER, H., 1969. Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates im Boden. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* **123**, 48-63.
- SHARPLEY, A. N. et al., 1984. A simplified soil and plant phosphorus model: II. Prediction of labile, organic and sorbed phosphorus. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **48**, 805-809.
- SHARPLEY, A. N. et al., 1989. Modeling soil and plant phosphorus dynamics in calcareous and highly weathered soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **53**, 153-158.
- SIMONIS, A. D. & BLADENOPOULOU, S. V., 1990. Residual phosphate studies on calcareous soils of Northern Greece. In: *Proc. of 10th World Fert. Cong. of CIEC*, 21-27 Oct., 1990, Nicosia-Cyprus (Eds.: WELTE, E. & SZABOLCS, I.) 265-277.
- SINGH, B. B. & JONES, J. P., 1977. Phosphorus sorption isotherm for evaluating phosphorus requirements of lettuce at five temperature regimes. *Plant and Soil.* **46**, 31-44.
- SUMNER, M. E. & FARINA, M. P. W., 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. *Adv. in Soil Sci.* **5**, 201-236.
- SUNTHEIM, L., MATZEL, W., & KUHLMANN, B., 1987. Untersuchungen zum Verlauf der P-Alterung im Boden. *Arch. Acker-, Pflanzenbau, Bodenk.* Berlin. **31**, 285-291.
- WILLIAMS, E. G. & REITH, J. W., 1971. Residual effects of phosphate and the relative effectiveness of annual and rotational dressings. *Min. Agric. Fisheries & Food, Techn. Bull. London* **20**, 16-32.
- WILLIAMS, J. H., BOYD, D. A. & FARRAR, K., 1971. Residual phosphate experiments on

- experimental husbandry farms. Min. Agric. Fisheries and Food, Techn. Bull. London. **20**. 42-79.
- WILSON, M. A. & ELLIS, B. G., 1984. Influence of calcium solution activity and surface area on the solubility of selected rock phosphates. Soil Sci. **138**. 354-359.
- WOLF, J. et al., 1987. Modeling long-term crop response to fertilizer phosphorus. I. The model. Agron. J., **79**. 445-451.

Érkezett: 1995. november 15.

THAMM FRIGYESNÉ

MTA Talajtani és Agrokémiai
Kutató Intézete, Budapest